

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálů a technologií pro automobily



**Vibrační test nosné struktury automobilového světlometu vyrobené 3D
tiskem**

Vibration test of support structure of automotive headlamp

Autor práce: Lukáš Kika

Vedoucí práce: Ing. Jiří Kulháněk, Ph.D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra materiálů a technologií pro automobily

Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Kika**
Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství
Studijní obor: 3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl
Téma: **Vibrační test nosné struktury automobilového světlometu vyrobené 3D tiskem**
Vibration test of support structure of automotive headlamp

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s principy vibračních testů se zaměřením na automobilové světlometry
2. Vytvořte upínací přípravek pro vibrační test světlometu, napodobující uchycení v automobilu
3. Realizujte vibrační test na elektromechanickém vibrátoru.
4. Realizujte test na hydraulickém válci.
5. Zpracujte a vyhodnoďte naměřené data. Zhodnoďte výhody a nevýhody obou měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1]SMETANA, Ctirad. Hluk a vibrace: měření a hodnocení. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [2]TŮMA, Jiří. Diagnostika strojů. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2116-0.
- [3]HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. Technická diagnostika a spolehlivost. II, Vibrodiagnostika. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0650-9.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Kulhánek, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018



doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právníké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.
Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.
- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

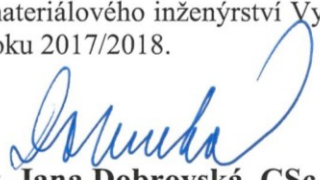
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

Prohlášení

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně.

V Ostravě 30. 4. 2018



Lukáš Kika

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá prováděním vibračních testů nosné struktury automobilového světlometu. Nosná struktura byla vyrobena 3D tiskem kovu práškovou metodou. Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část.

Teoretická část bakalářské práce obsahuje princip a metody měření a popis zařízení, na kterých byla měření prováděna. Vibrační zkoušky se prováděly na dvou vibračních zařízeních. První test probíhal na elektromechanickém vibrátoru a test druhý byl proveden na hydraulickém válci.

Experimentální část se krátce zmiňuje o popisu technologie 3D tisku práškovou metodou. Dále zahrnuje výrobu upínacího přípravku pro vibrační test světlometu, metodiku měření, zpracování naměřených dat včetně vyhodnocení a porovnání s daty získanými od firmy, která se zabývá výrobou automobilových světlometů.

Klíčová slova: vibrační zkoušky, 3D tisk kovu práškovou metodou, rámeček automobilového světlometu, elektromechanický vibrátor, hydraulický válec

Abstract

This bachelor's thesis deals with the performance of vibration tests of car light structure. The supporting structure was made by 3D printing using a metallic powder method. The work is divided into the theoretical and experimental part

The theoretical part contains the principle and methods of measurement and characteristics of devices, on which the measurements were made. Vibration tests were performed on two vibration devices. The first test was performed on an industrial electromechanical vibrator and the second test was performed on the hydraulic cylinder.

The experimental part briefly mentions the description of the 3D metal printing technology. It also includes the production of a fixture for the vibration test of the headlamp, the measurement methodology, the processing of the measured data, including the evaluation and comparison with the data obtained from the company that deals with the production of automobile headlamps.

Keywords: vibration tests, 3D metal printing technology, car headlight frame, industrial electromechanical vibrator, hydraulic cylinder

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Jiřímu Kulhánkovi, Ph.D. za předané vědomosti v oblasti obsluhy zařízení použitých při měřeních, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

Obsah

Úvod.....	1
1. Princip měření vibrací se zaměřením na automobilové světlomety	2
1.1. Vibrace – základní vztahy	2
1.2. Snímače vibrací	3
1.3. Bezdotykové měření lineárních a úhlových kmitů Dopplerovským laserem	5
1.4. Dopplerův jev	6
1.5. Požadavky na vibrační snímače.....	6
1.6. Rezonance	7
1.7. Modální analýza a její využití	7
2. Měřicí aparatura	8
2.1. Měřicí aparatura pro test na elektromechanickém vibrátoru.....	8
Laserový vibrometr OMETRON VH 1000-D	8
Funkční generátor MATRIX MFG 2110A.....	9
Vibrátor TIRA TV 52110 včetně zesilovače signálu BAA 120	10
Měřicí karta cRIO 9233 s USB rozhraním cDAQ 9171	11
2.2. Měřicí aparatura pro test na hydraulickém válci	12
Hydraulický válec série CGS 280 včetně ovládacího panelu.....	12
3. Výroba upínacího přípravku pro vibrační test světlometu a popis 3D technologie.....	13
3.1. Popis 3D modelu držáku rámečku světlometu	13
3.2. Technologie výroby 3D tiskem	15
3.3. Výroba rámečku 3D tiskem.....	15
3.4. Konstrukce držáku rámečku světlometu	16
4. Metodika měření na elektromechanickém vibrátoru.....	19
4.1. Měřené frekvenční pásmo	19
4.2. Měřicí řetězec	20
4.3. Postup měření	21

4.4.	Sestava měření.....	22
4.5.	Naměřené hodnoty na elektromechanickém vibrátoru	24
4.6.	Zpracování naměřených hodnot z elektromechanického vibrátoru.....	26
5.	Metodika měření na hydraulickém válci	30
5.1.	Výroba a sestavení přípravku proti protáčení pístnice hydraulického válce	30
5.2.	Testovací spuštění hydraulického válce.....	32
5.3.	Měřené pásmo frekvence	34
5.4.	Měřicí řetězec pro hydraulický válec.....	34
5.5.	Postup měření na hydraulickém válci	35
5.6.	Sestava měření na hydraulickém válci.....	36
5.7.	Zpracování naměřených hodnot z hydraulického válce.....	37
	Zpracování grafů při testu na hydraulickém válci	38
	Odečítání hodnot z grafů zrychlení.....	40
6.	Závěr.....	43
	Literatura	45
	Zdroje obrázků.....	46

Úvod

Cílem měření je ověřit frekvenční přenos nosné struktury prototypového světloometu vyrobeného metodou 3D tisku z kovu. Cílem měření je zjistit, při jaké frekvenci dochází k výskytu první rezonanční frekvence.

Pro měření vibrací bude zapotřebí znát zatěžující budící spektrum vibrací z vozovky, popřípadě standardní budící spektrum používané pro kontrolu komponent v automobilovém průmyslu.

Dále bude nutné rámeček upnout na budič vibrací způsobem stejným, jako v reálném světloometu s dalšími komponentami nebo jejich náhradami. Samotné měření bude provedeno orientačním způsobem pomocí bezdotykového laserového vibrometru. V první části se vibrační test bude provádět na elektromechanickém vibrátoru, ve druhé části se bude provádět test na hydraulickém válci.

Vyhodnocení bude obsahovat rezonanční frekvence, místa rámečku s maximální amplitudou vibrací a zhodnocení výhod i nevýhod obou měření.

1. Princip měření vibrací se zaměřením na automobilové světlomety

Během svého životního cyklu jsou všechny části automobilu vystavovány vibracím, které pochází především z vozovky, mohou však také pocházet např. z chodu motoru. U automobilových světlometů tomu není jinak. Pro zajištění funkčnosti a odolnosti vůči zatížení světlometů v provozu se provádí zkoušky, které simulují reálné zatížení rámečku světlometu v provozu.

1.1. Vibrace – základní vztahy

Vibrace jsou kmitání, neboli také oscilace mechanické soustavy, kde jednotlivé hmotné body vykonávají vratný pohyb kolem své klidové rovnovážné polohy. S vibracemi se setkáváme neustále, jelikož všechna tělesa nebo částice vykonávají pohyb a jsou tudíž i zdrojem vibrací. Ve většině případů je mechanické kmitání způsobeno provozem různých mechanismů a strojů, nebo například i přírodní silou v podobě zemětřesení. Mechanické kmitání, tedy vibrace, se v rozsahu slyšitelných kmitočtů dříve nazývalo chvění. Vibrace nejen že nepříznivě ovlivňují člověka, ale vliv nadměrných vibrací také snižuje životnost strojů a konstrukcí. Obzvláště v posledních několika letech vlivem snahy co nejvíce odlehčit a zjednodušit stroje, je pozorován výskyt častých nepříznivých projevů vibračního namáhání.[8]

V následujících odstavcích jsou vypsány základní matematické vztahy týkající se vibrací [1];

Výchylka (od ustálené polohy) – jednotky [m], [mm] $x(t) = \iint a(t)dt$

Rychlost – jednotky [m/s], [mm/s] $\dot{x}(t) = \int a(t)dt$

Zrychlení – jednotky [m/s²], [g] $\ddot{x}(t) = a(t)$

Harmonický průběh výchylek, rychlosti a zrychlení:

$$x(t) = X \cos(\omega t) \quad = -A/\omega^2 \cos(\omega t)$$

$$\dot{x}(t) = -X\omega \sin(\omega t) \quad = A/\omega \sin(\omega t)$$

$$\ddot{x}(t) = -X\omega^2 \cos(\omega t) \quad = A \cos(\omega t)$$

Efektivní hodnota (RMS - Root Mean Square, neboli druhá odmocnina ze střední hodnoty kvadrátu časového průběhu funkce) signálu $y(t)$:

Průměr - kvadrát

$$y_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt}$$

Relativní jednotky pro hladinu vibrací:

$$a_{REF} = 10^{-6} \text{ m/s}^2$$

$$v_{REF} = 10^{-9} \text{ m/s} = 10^{-6} \text{ mm/s}$$

$$(F_{REF} = 10^{-6} \text{ N síla})$$

$$1g \dots 20 \log(10/10^{-6}) = 140 \text{ dB}$$

$$L = 20 \log \left(\frac{y}{y_{REF}} \right) [dB]$$

Reference (RMS)

1.2. Snímače vibrací

Snímače pohybů se dají rozdělit podle jejich primárního výstupu (signálu), který se už nemusí derivovat nebo integrovat, abychom dostali jinou veličinu než je měřená veličina (např. změřené zrychlení se integruje dodatečně na rychlost). [1]

- Výchylka (od ustálené polohy) – snímač výchylky (přiblížení)
- Rychlost – snímač rychlosti
- Zrychlení – snímač zrychlení (akcelerometr)

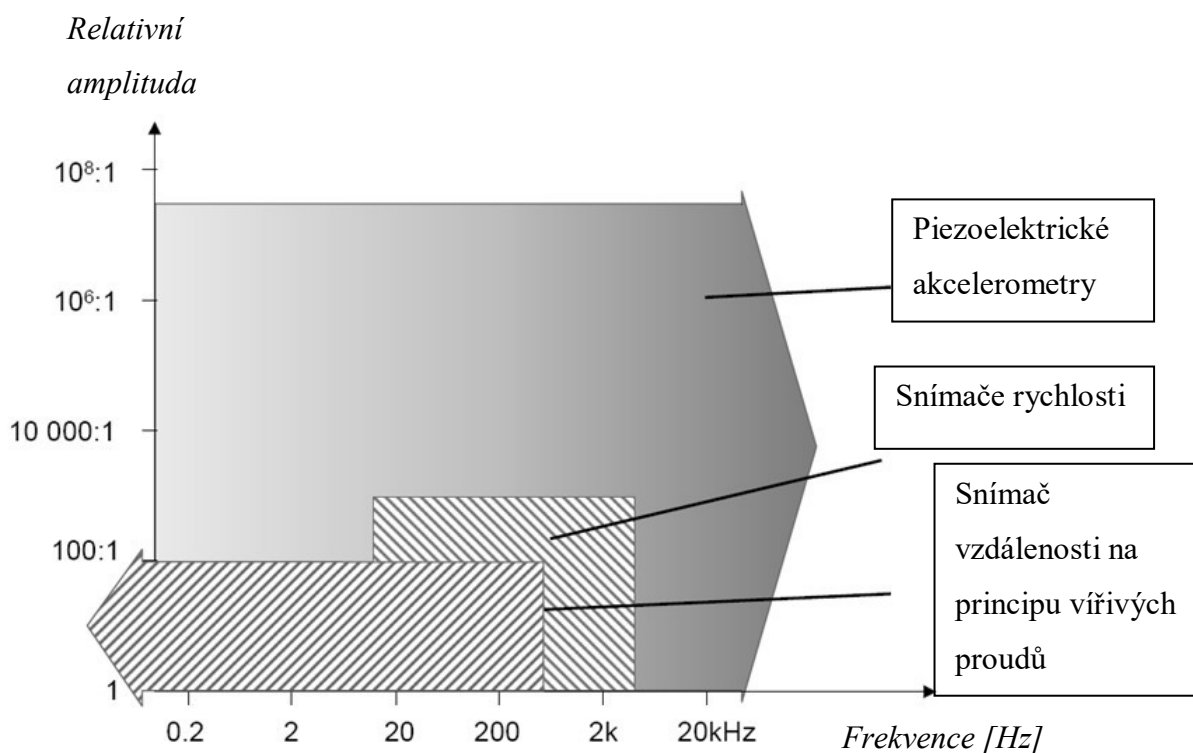
Snímače výchylky (v diagnostice Proximity probe – sonda přiblížení na principu vířivých proudů – eddy current)

Snímače rychlosti (na principu indukce napětí na koncích vodiče, který se pohybuje v magnetickém poli)

Snímače zrychlení – akcelerometry [2]:

- Piezoelektrické – využívají piezoelektrický krystal, který generuje náboj úměrný působící síle, která při zrychlení působí na každý objekt
- Piezorezistivní – využívá mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně odporu
- Akcelerometry s proměnnou kapacitou – využívá mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně kapacity

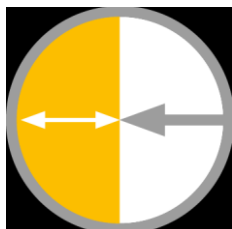
Rozsahy snímačů zmiňované v předešlém odstavci jsou znázorněny na **Obrázek 1**.



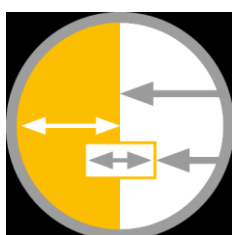
Obrázek 1 Pracovní rozsahy snímačů [převzato z 1]

1.3. Bezdotykové měření lineárních a úhlových kmitů Dopplerovským laserem

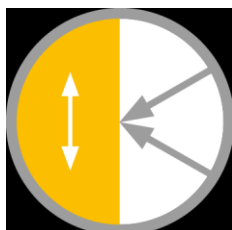
Přehled a dělení laserových vibrometrů: [Obrázky převzaty z 7]



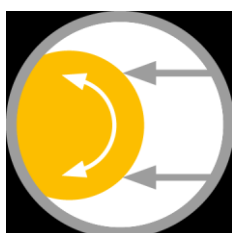
Jednobodový vibrometr pro měření v příčném směru (Single point vibrometry) měří vibrace objektu ve směru laserového paprsku. Tato metoda se využívá v mikroskopických aplikacích a při měření na velké vzdálenosti. [7]



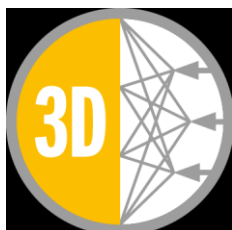
Diferenciální vibrometr (Differential out-of plane vibrometer) popisuje měření vibrací ve dvou bodech, které vzájemně vibrují. Obvykle se využívají dvě metody: rozdíl se generuje přímo v optické dráze, nebo se rozdíl vypočítá elektronicky pomocí dvou nezávislých interferometrů. [7]



Vibrometr pro měření v podélném směru (In-plane vibrometers) popisuje měření vibrací a pohybů kolmo na osu měření. Využívá se to pro bezkontaktní detekování zdvihového pohybu pístů, hřídelí ventilů. [7]



Rotační vibrometr (Rotational Vibrometer) popisuje měření úhlové rychlosti a úhlového posunutí rotačních zařízení. Takto je analyzována dynamika rotace pohonů, plynových turbín, elektrických generátorů atd. [7]

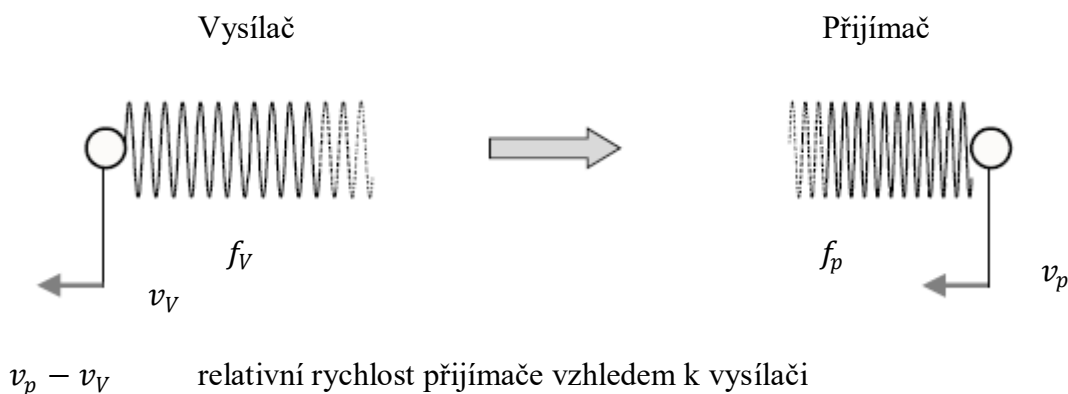


3D scanning vibrometer popisuje měření vibrací, při kterém laserový paprsek postupně skenuje povrch vzorku. [7]

1.4. Dopplerův jev

Je to jev, při kterém dochází ke změně frekvence a vlnové délky přijímaného signálu oproti signálu vysílanému, způsobené nenulovou vzájemnou rychlostí přijímače a vysílače. Předpokládáme, že se pozorovatel i zdroj pohybují po stejné přímce. Vztah mezi vlnovou délkou a frekvencí je $\lambda = v/f$. V roce 1842 byl jev poprvé popsán Christianem Dopplerem. [5]

Rychlost šíření vlnění (světla nebo zvuku) c : [1]



$$f_p = f_v \frac{c}{c + v_V - v_p}$$

Přibližný vzorec

$$f_p = f_v \frac{1}{1 + (v_V - v_p)/c} \approx f_v \left(1 + \frac{v_p - v_V}{c} \right) |v_p - v_V| \ll c$$

1.5. Požadavky na vibrační snímače

Při měření vibrací a otřesů je potřeba, aby byly splněny zvláštní požadavky. Výstupní signál z vibračního snímače musí věrně odpovídat časovému průběhu mechanického kmitání. Zvláště při měření otřesů musí být měřicí systém nastaven na co nejširší kmitočtový rozsah. V ideálním případě je to od stejnosměrné hodnoty do nekonečného kmitočtu. Kvůli zúžení kmitočtového rozsahu dochází ke vzniku systematické chyby měření, která se přičítá k dalším chybám vyplývajícím z nepřesnosti kalibrace, nelinearit snímače a měřicího systému. [3]

1.6. Rezonance

Rezonance jako taková vibrace nezpůsobuje, jen zesiluje, až do vysokých hodnot a má za příčinu vysokou citlivost stroje na silové působení s rezonanční frekvencí. Je tedy možno říci, že rezonance je velmi častá, avšak někdy neznámá příčina velkých vibrací. Každá část strojního systému má svoji tuhost a hmotnost, to znamená, že při silovém působení na tyto části se rozkmitají a doby kmitání závisí na již zmiňované tuhosti a hmotnosti, a na které frekvenci silového působení je ta či ona část zvláště citlivá. V praxi to znamená, že když se otáčková frekvence stroje (nebo jeho části) přiblíží této obzvláště citlivé frekvenci (rezonanční frekvence) nebo frekvenci nějaké střídavé budící síly, nastávají vibrační problémy – rezonanční problémy. [4]

1.7. Modální analýza a její využití

Modální analýza je obor dynamiky, který k popisu kmitavých vlastností a kmitového chování inženýrských konstrukcí (respektive jejich částí, nazývané soustavy) užívá možnosti rozkladu složitého kmitavého procesu na dílčí, tzv. modální (vlastní) příspěvky. Každý příspěvek je charakterizován modální frekvencí a modálním tvarem kmitu.

Při experimentálním vyšetřování se odměřuje odezva konstrukcí při jejich řízeném buzení ve zvolení sítí bodů na povrchu konstrukce. Z vyhodnocených frekvenčních přenosů mezi jednotlivými dvojicemi bodů se určují modální frekvence a modální tvary kmitu regresním výpočtem z odměřených údajů.

Modální analýza je užitečná především ke stanovení vlastních frekvencí soustavy, stanovení tlumení na těchto vlastních frekvencích a stanovení vlastních tvarů kmitů, tedy tvarů deformací soustavy při vibraci na vlastních frekvencích. Metodou modální analýzy se dají určovat modální frekvence soustavy, které při souhlasu s budícími frekvencemi mohou vést k nadměrnému rozkmitání (rezonance), a tím ke snížení životnosti a spolehlivosti konstrukcí. [4]

2. Měřicí aparatura

Následující kapitola se bude zmiňovat o měřicí aparatuře využitě při měření včetně jejich parametrů.

2.1. Měřicí aparatura pro test na elektromechanickém vibrátoru

K měření byly využity následující zařízení:

- Laserový vibrometr OMETRON VH 1000-D
- Vibrátor TIRA TV 52110
- Zesilovač signálu k vibrátoru TIRA – BAA 120
- Frekvenční generátor MATRIX MFG 2110A
- Měřicí karta NI cRIO 9233
- USB rozhraní pro připojení měřicí karty k notebooku NI cDAQ-9171

Laserový vibrometr OMETRON VH 1000-D

Jedná se o laserový vibrometr (**Obrázek 2**) s principem měření založeném na dopplerovském jevu. Měřená veličina je rychlost pohybu sledovaného povrchu ve směru kolmém k vysílanému paprsku. Na polohu či zrychlení musí být tato měřená veličina následně převedena numerickou derivací nebo integrací.

Doporučená vzdálenost mezi laserem a vzorkem je $100\text{mm} + n * 138\text{mm}$, tedy řada 100mm, 238mm, 376mm, 514mm,...

Parametry laserového vibrometru:

V tabulce pod textem (**Tabulka 1**) jsou uvedeny parametry laserového vibrometru OMETRON VH 1000D. **Obrázek 2** pod tabulkou je fotografie laserového vibrometru.

Tabulka 1 Parametry laserového vibrometru OMETRON VH 1000D

Rozsah výstupního signálu	$\pm 4V$
Frekvenční rozsah	0,5 Hz ... 22 kHz
Citlivost A/D převodníku	24 bit
Zpoždění měřeného signálu	1,1 ms
Rozsah měření	20,100,500 mm/s
Citlivost	5, 25, 125 (mm/s)/v
Maximální zrychlení	2760, 13800, 69000 m/s ²



Obrázek 2 Laserový vibrometr OMETRON VH 1000-D

Funkční generátor MATRIX MFG 2110A

Jako zdroj budícího signálu byl použit funkční generátor MATRIX MFG 2110A (**Obrázek 3**). Generátor má plně digitální volbu tvaru signálu a jeho frekvence, amplitudy případně offsetu. Jako tvar budícího signálu byl zvolen sinusový harmonický signál.



Obrázek 3 Funkční generátor MATRIX MFG 2110A

Vibrátor TIRA TV 52110 včetně zesilovače signálu BAA 120

Jako budič signálu pro experiment byl využit vibrátor TIRA TV 52110 (**Obrázek 4**) se zesilovačem BAA120 (**Obrázek 5**). Vibrátor byl orientován ve svislé poloze, budicí frekvence tedy také byla ve svislé ose Z. Parametry vibrátoru jsou zaznamenány v **Tabulka 2**.

Tabulka 2 Parametry vibrátoru TIRA (pro harmonický sinusový signál)

Maximální síla	100 N
Frekvenční rozsah	2Hz-7000Hz
Maximální rozsah kmitu	15 mm
Maximální rychlost	1,5 m/s
Maximální zrychlení	50 g
Maximální zátěž	3 Kg
Rezonanční frekvence	>5700 Hz (bez zátěže)



Obrázek 4 Vibrátor TIRA TV52110



Obrázek 5 Zesilovač signálu BAA120

Měřicí karta cRIO 9233 s USB rozhraním cDAQ 9171

Měření signálu z laserového vibrometru bylo provedenou kartou cRIO 9233 s USB rozhraním. Jedná se o 4 kanálovou měřicí kartu s 24 bitovým AD převodníkem a 4 násobným simultánním vstupem. Karta je určena pro měření proměnných signálů s frekvencí minimálně 0,5 Hz – neměří tedy statickou polohu. Parametry měřicí karty cRIO 9233 (**Obrázek 6**) s USB rozhraním cDAQ 9171 jsou zaznamenány v následující tabulce (**Tabulka 3**).

Tabulka 3 parametry měřicí karty cRIO 9233 s USB rozhraním cDAQ 9171

Počet měřených kanálů	4 analogové vstupní kanály
Rozlišovací přesnost převodníku	24 bit/s
Typ AD převodníku	Delta-Sigma
Přesnost	$\pm 0,6$ dB
Rozsah měřených frekvencí	0,5 Hz – 10 kHz

Karta je primárně určena pro měření v real-time platformě typu cRIO. Pro měření se standardním notebookem je možné ji připojit pomocí USB rozhraní cDAQ 9171 (**Obrázek 7**).



Obrázek 6 Karta NI cRIO 9233



Obrázek 7 Rozhraní cDAQ 9171

2.2. Měřicí aparatura pro test na hydraulickém válci

Při vibračních testech na hydraulickém válci byla z části využita stejná měřicí aparatura jako při měření na elektromechanickém vibrátoru.

Seznam zařízení použitých k měření, která jsou popsána v předešlé kapitole:

- Laserový vibrometr OMETRON VH 1000-D
- Měřicí karta NI cRIO 9233
- USB rozhraní pro připojení měřicí karty k notebooku NI cDAQ-9171

Při tomto experimentu byl elektromechanický vibrátor nahrazen hydraulickým válcem, který ke svému chodu potřebuje řadu komponent.

Hydraulický válec série CGS 280 včetně ovládacího panelu

Servo válce s hydrostatickými ložisky (**Obrázek 8**) se používají při testování součástek, materiálů a kdekoliv jinde, kde je potřeba nejvyšší dynamické odezvy a přesnosti. Válec používaný při tomto testu je navržen pro práci při tlaku 280 barů a je schopný pracovat se silami od 10 do 1000 kN. Válec je schopen vyvolat pohyb pístu od 50 do 500 mm v 50 mm krocích. [10] Válec byl při testování postaven vertikálně, ale je možnost ho používat i v horizontální poloze. Jako kapalina kolující ve válci a celém systému zabezpečujícím chod hydraulického válce je použita hydraulická kapalina na bázi minerálních olejů.



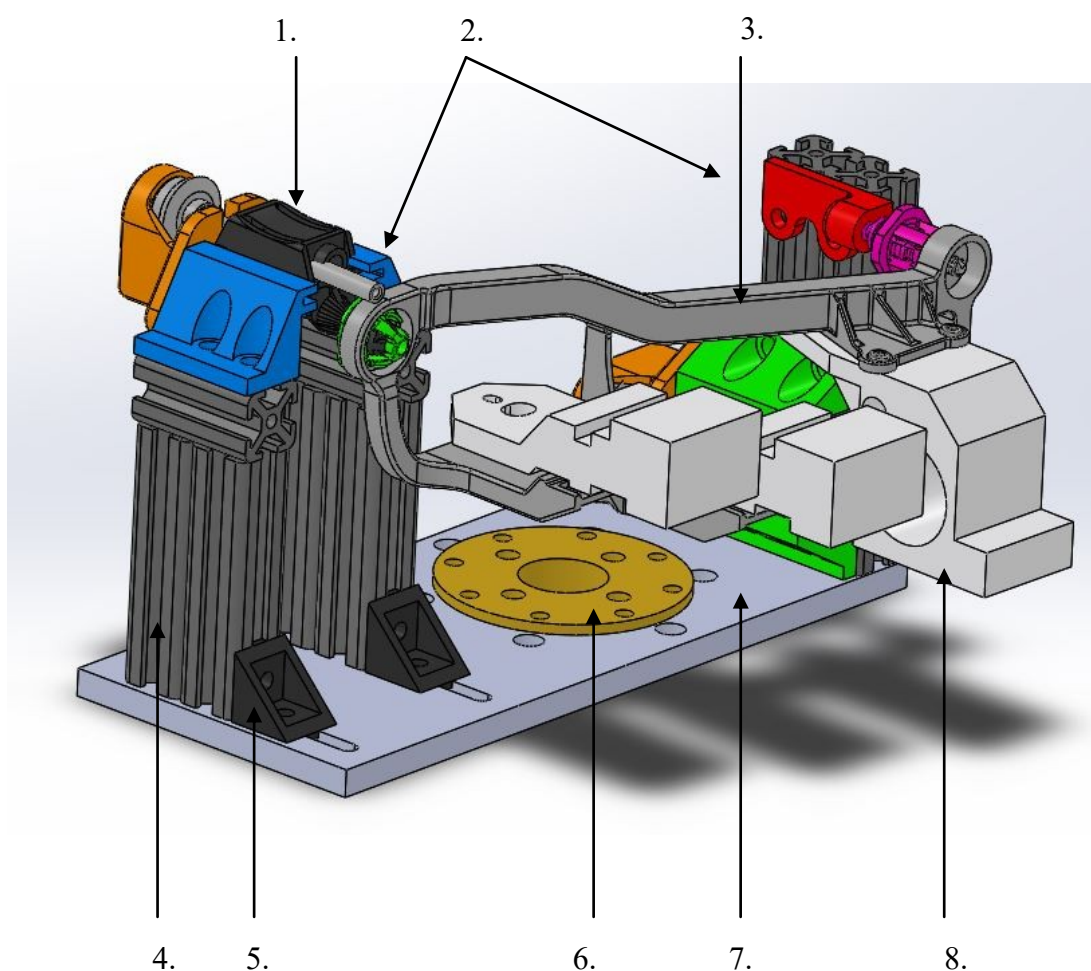
Obrázek 8 Hydraulický válec CGS 280 včetně ovládacího panelu [převzato z 10]

3. Výroba upínacího přípravku pro vibrační test světloometu a popis 3D technologie

Následující kapitola se bude zmiňovat o výrobě upínacího přípravku pro vibrační testy a popis 3D technologie tisku kovu práškovou metodou.

3.1. Popis 3D modelu držáku rámečku světloometu

Hotový držák rámečku světloometu včetně rámečku světloometu je zobrazen na následujícím 3D modelu (**Obrázek 9**). Tato sestava včetně všech jeho komponent se testovala na jednotlivých zařízeních.



Obrázek 9 3D model držáku rámečku světloometu

1. Držák světlometu firmy Varroc Lighting Systems – firma Varroc Lighting Systems pro náš experiment poskytla držák světlometu, který jsme umístili na stojan a simulovali umístění světlometu na autě. Tento držák není statický, což nám umožňuje drobný posuv v jednom směru - dá se tak doladit vzdálenost rámečku světlometu od stojanu.
2. 3D výtisky – 3D výtisky z plastu zajišťují uchycení 3 částí držáků rámečku světlometu ke stojanu.
3. Rámeček světlometu – vytištěný práškovou metodou z kovu, je předmětem zkoumání při jednotlivých vibračních zkouškách.
4. Hliníkový profil – standardní hliníkový profil s drážkami, který v našem případě posloužil jako stojna pro celou konstrukci držáku rámečku světlometu.
5. Úhlová spojka pro hliníkový profil – umožňuje pravoúhlé uchycení jednotlivých stojen ke hliníkové podložce.
6. 3D výtisk pro uchycení rámečku držáku rámečku světlometu k vibračnímu zařízení – 3D výtisk se čtyřmi dírami sloužícími k přišroubování celku k elektromechanickému vibrátoru.
7. Hliníková podložka – vyrobená pomocí CNC frézování, obsahuje drážky pro uchycení stojen a díry pro přichycení 3D výtisku zmiňovaného v předešlém bodě.
8. Závaží simulující reálné hmotnostní zatížení světlometu – frézované na CNC obráběcím stroji, mají za úkol napodobit reálné zatížení světlometu v provozu.

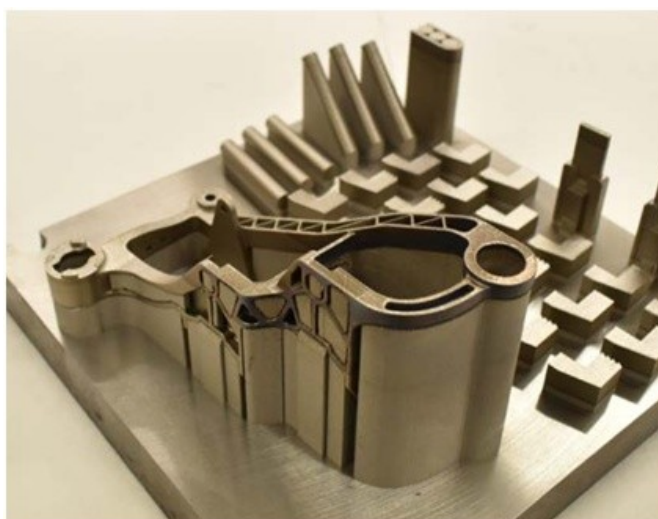
3.2. Technologie výroby 3D tiskem

3D tisk technologií SLS (Selective Laser Sintering) umožňuje využití kovového materiálu. Podle typu tiskárny se dá jako náplň uplatnit ocelový prášek, speciální nízkotavitelné slitiny bronzů nebo dokonce slitiny titanu. V našem případě byla použita nástrojová ocel. Kov se hodí pro tisk sériových funkčních modelů, prototypů a dílů.

Technologie SLS spojuje kovovou hmotu pomocí výkonného laserového paprsku. Jde o inovativní technologii, která nahrazuje klasické obrábění. Kovový materiál má podobu prášku, který se spéká po tenkých vrstvách. K prášku se přidává polymerní pojivo, aby předmět neměnil tvar. Vzniklá tavenina jedné vrstvy tak velmi rychle tuhne, aby se na ní mohla vytvářet vrstva nová. Po vytištění je předmět vypékán, aby se pojivo spálilo. Povrch předmětu lze tryskat, brousit nebo leštit. Předměty se dají svařovat nebo obrábět jako jakýkoliv jiný klasický kovový materiál. Tato metoda je však nákladná. Pokud však půjde o velmi složité struktury s náročnou geometrií a mnoha detailními prvky, je tato metoda výhodnější než klasické technologie. [6]

3.3. Výroba rámečku 3D tiskem

Rámeček světlometu, který byl předmětem testování této práce, byl vyroben technologií 3D tisku z metalického prášku EOS MaragingSteel MS1/400W. Na následujícím obrázku (**Obrázek 10**) je zobrazen vytištěný rámeček těsně po vytištění včetně podpor. Podpory u 3D tisku slouží jako základny pro tisk plochy umístěné v prostoru.



Obrázek 10 Rámeček světlometu těsně po vytištění

3.4. Konstrukce držáku rámečku světlometu

Držák rámečku světlometu byl vytvořen ze dvou hlavních částí: podstava a nosný rámeček. Podstava byla vyfrézovaná na CNC obráběcím stroji. Tato podložka obsahuje díry pro přišroubování jednotlivých profilů a díru, do které byl vsazen 3D výtisk zajišťující přišroubování k vibrátoru kde se prováděly vibrační zkoušky. Rámeček byl vyroben z hliníkových profilů na základě 3D modelu. Jednotlivé hliníkové profily byly nařezány na požadované rozměry na pásové pile. Pomocí šroubků byly přišroubovány na podstavu, kde byly vyfrézované díry se zapuštěním pro hlavu šroubu. Poté se pro větší stabilitu rámečku k sobě jednotlivé stojny připevňovaly pomocí 3D výtisků. Stojny byly také pomocí hliníkových úhlových spojek připevněny k podložce, což zajišťovalo jejich větší stabilitu. Spoj byl proveden pomocí šroubu, který byl zašroubován do matic nacházejících se v drážkách. Všechny 3D výtisky se k hliníkovým profilům připevňovaly pomocí šroubu a speciálních profilových matic viz **Obrázek 11**.



Obrázek 11 Hliníkový profil s 3D výtiskem

Firma Varroc Lighting Systems s.r.o. dodala pro náš účel speciální držák, který se používá přímo na uchycení rámečku světlometu. Tento držák má na svém konci speciální otočný kloub, který umožňuje manipulaci a otáčení do všech směrů. Takto se dá vycentrovat rámeček už přímo připevněný na stojan. Tento držák se dá také délkově posouvat pomocí ozubeného kolečka na jeho druhém konci, viz **Obrázek 12**.



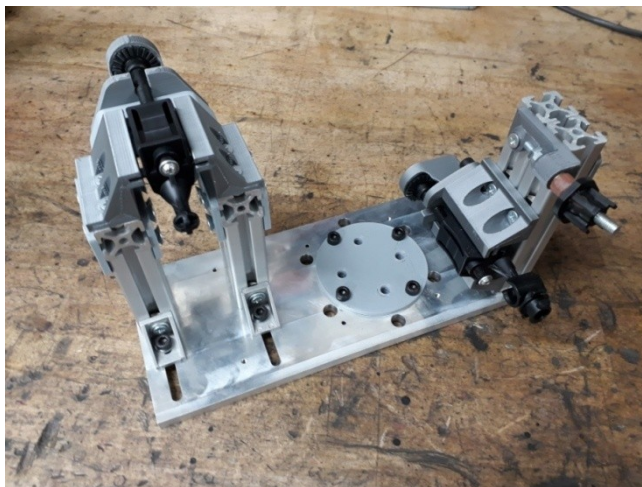
Obrázek 12 Detail držáku světlometu

Tento držák se vsunul pomocí bočních hran do dvou stojen. Do 3D výtisků byly nainstalovány závitové vložky. To se provedlo jejich nahřáním a pomocí přípravku byly vsunuty do předem vyvrtané díry, která měla přesné rozměry zadané v datovém listu poskytnutém k těmto závitovým vložkám. Takhle byla zhotovena první část stojanu. Postup montáže závitů do 3D výtisku je znázorněn na obrázku pod textem (**Obrázek 13**).



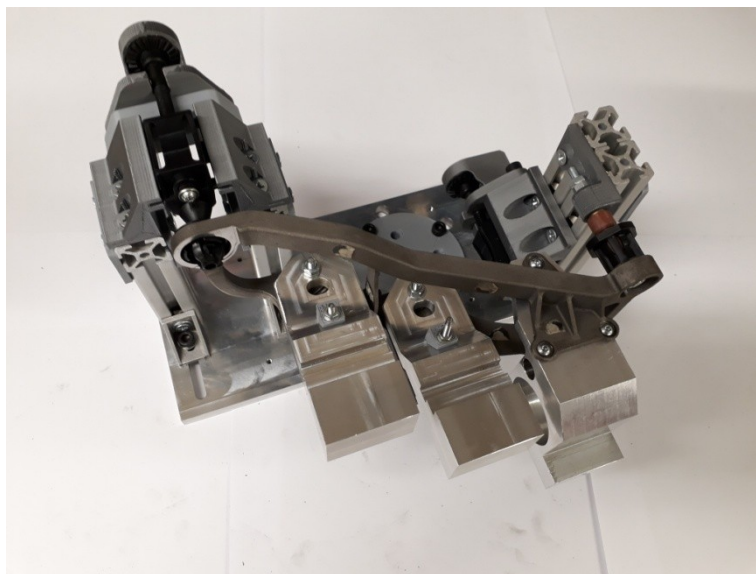
Obrázek 13 Přípravek pro vsunutí závitových vložek do 3D výtisku

Druhá část se montovala obdobně jako ta první, ovšem s výjimkou využití jiných komponent. Takto zhotovený stojan je znázorněn na následujícím obrázku (**Obrázek 14**).



Obrázek 14 Zkompletovaný stojan

Nakonec se na hotový stojan připevnil rámeček světlometu vyrobený práškovou metodou 3D tisku. Na něj se umístila 3 hliníková závaží, která simulují hmotnostní zatížení čočky a ostatních komponent které obsahuje světlomet automobilu. Rámeček se na stojan umístil na dva otočné plastové klouby a třetí, poslední část, byla provedena pomocí šroubového spojení. Finální podoba stojanu s rámečkem světlometu, která je připravená na vibrační zkoušky je zobrazena viz **Obrázek 15**.



Obrázek 15 Stojan s připevněným rámečkem připravený na vibrační zkoušky

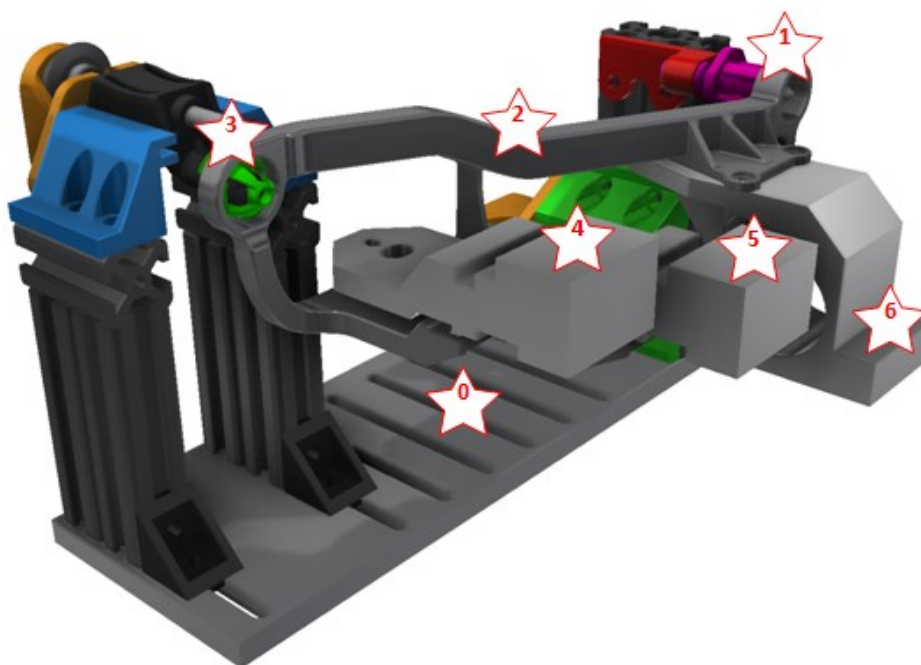
4. Metodika měření na elektromechanickém vibrátoru

Cílem měření je ověřit chování nosného rámečku světloometu v podmínkách maximálně se blížících reálnému stavu. Pro měření byl použit harmonický budicí signál umožňující vybudit sestavu do rezonanční frekvence.

4.1. Měření frekvenční pásma

Zatěžovací spektrum je buďto uvažováno uměle generované na zkušebně, nebo reálně měřené z vozovky. Uměle generované zatěžovací spektra na dynamických zkušebnách se pohybují pro testy světlometů od (5Hz – 10Hz) do (200Hz – 1000Hz) podle typu světlometu a aplikují se v mnohahodinových zkouškách sweep režimem. Zrychlení, kterým je světlomet zatěžován je v rozsahu 1g – 3g (RMS). Obvykle naměřené první rezonanční frekvence se pohybují v oblasti od 30 – 50Hz.

Pro náš test jsme uvažovali frekvenční pásmo 5-50Hz s krokem 5Hz – tedy měření pro 10 frekvencí 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 a 50[Hz]. Pro každou frekvenci jsme provedli celkem 7 měření vibrací na rámečku světlometu. Hvězdičkou označený bod 0 slouží jako referenční měření odpovídající budicí frekvenci. Hvězdičkou označené body 1-3 jsou vibrace samotného nosného rámečku, body 4-6 odpovídají vibracím světelných zdrojů.



Obrázek 16 Body měření 0 až 6 na rámečku s náhradními hmotnostmi

4.2. Měřicí řetězec

Sestava použitá při měření se skládá z řady komponent, viz **Obrázek 17**. Zdrojem sinusového signálu (1) je funkční generátor, poté je signál zesílen v zesilovači (2) a přiveden do vibrátoru (3). Na přírubu vibrátoru je uchycen měřený rámeček včetně držáku (4). Na vibrujícím rámečku a na upínací základně je laserovým vibrometrem (5) měřena řada signálů (v různých bodech). Měřené signály jsou pomocí měřicí karty (6) a USB rozhraní (7) uloženy do notebooku se SW SignalExpress (8).

Z počtu použitých komponent je zřejmé, že měření bude zatíženo řadou nepřesností jednotlivých komponent. Zejména generování signálu mezi komponentami 1-2-3-4 je nepredikovatelné – úroveň výchylky (rychlosti i zrychlení) je ovlivněna nastavením zesilovače 2, které je manuální. Amplituda požadované polohy/rychlosti/zrychlení tedy nelze exaktně nastavit a musí být odměřena z referenčního bodu.



Obrázek 17 Schéma měřicího řetězce pro test na elektromechanickém vibrátoru

4.3. Postup měření

Proměření frekvenční odezvy nosného rámečku světlometu vyžaduje měření v různých bodech a pro různé funkce. Problematiku měření různých frekvencí je možné realizovat proměřením „celého“ frekvenčního spektra tak, že součást zatěžíme bílým šumem a měříme frekvenční přenos. Na komplikovanějších sestavách, obsahujících nelinearity, je vhodnější vybudit měřený vzorek přímo harmonickým signálem, který zohlední také nelinearity systému.

V provedeném měření bylo pro jeho jednoduchost a také z důvodu měření větší sestavy zvoleno buzení harmonických signálem.

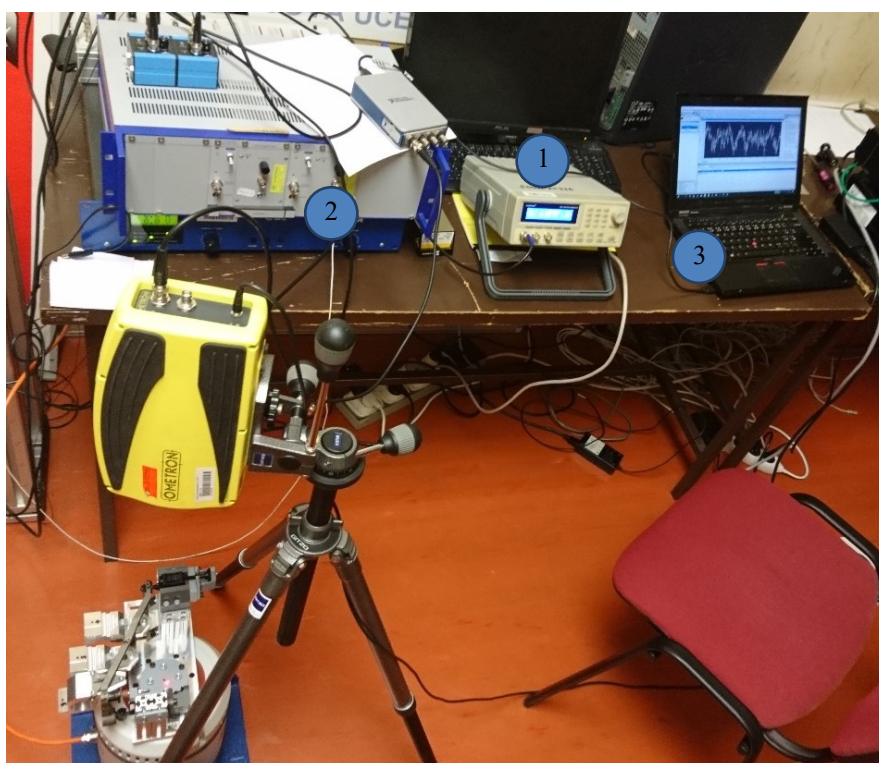
Postup měření sestával z následujících kroků:

1. Nastavení budící frekvence na signálovém generátoru
2. Korekce amplitudy na zesilovači signálu – cílem je vybudit měřenou součást dostatečně, zároveň však vlastní frekvence nesmí zničit součást nebo vibrátor. Vybuzení zesilovačem začíná z minima a postupně se zvyšuje na vhodnou úroveň podle subjektivního přístupu obsluhy.
3. Proměření signálu rychlosti ve zvolených bodech součásti. Vždy je nutné proměřit pohyb základové desky (bod 0), který se bere jako referenční a poté signál rychlosti ve zvolených bodech měřené součásti. Zvolené body jsme označili černým fixem pro zajištění opakovatelnosti měření

Uvedený postup jsme zopakovali pro řadu frekvencí z předem definovaného frekvenčního pásma 5 – 50 Hz.

4.4. Sestava měření

Následující obrázek ukazuje reálnou sestavu měření, viz **Obrázek 18**. Na signálovém generátoru (pozice 1) byly postupně nastavovány frekvence 5 – 50 Hz. Poté byly na zesilovači (pozice 2) nastaveno zesílení tak, aby vibrace celé sestavy byly maximální, bez nežádoucích jevů (pohyb mimo rozsah vibrátoru, nepravidelný chod atp.). Na notebooku (pozice 3) byly poté zaznamenány měřené vibrace v softwaru NI SignalExpress.



Obrázek 18 Reálná sestava z měření vibrací na elektromechanickém vibrátoru

Na fotografiích zobrazených pod tímto textem je znázorněno porovnání řešení umístění rámečku světlometu na elektromechanickém vibrátoru.

Na fotografii vlevo (**Obrázek 19**) je zachycena sestava elektromechanického vibrátoru a rámečku světlometu, včetně závaží a stojanu, ke kterému je tento rámeček uchycen. V obou případech slouží jako stojan světlometu hliníková konstrukce, včetně hliníkové podstavy, na které je tato konstrukce připevněna. Umístění celé sestavy je v tomto případě vertikální. Na této sestavě bylo prováděno měření a následné vyhodnocování výsledků.

Obrázek vpravo (**Obrázek 20**) je převzat z práce [9], u které bylo cílem teoreticky vypočítat chování světlometu při vibračním zatížení a v další části byly tyto výsledky ověřeny v praxi právě na elektromechanickém vibrátoru, stejně jako v našem případě. Na rozdíl od levého obrázku, kde je cílem měření zjistit pouze chování rámečku světlometu, je v tomto případě testován kompletní světlomet včetně všech jeho vnitřních komponent. Umístění celé sestavy je v tomto případě horizontální.



Obrázek 19 Detail řešení umístění rámečku světlometu na elektromechanickém vibrátoru

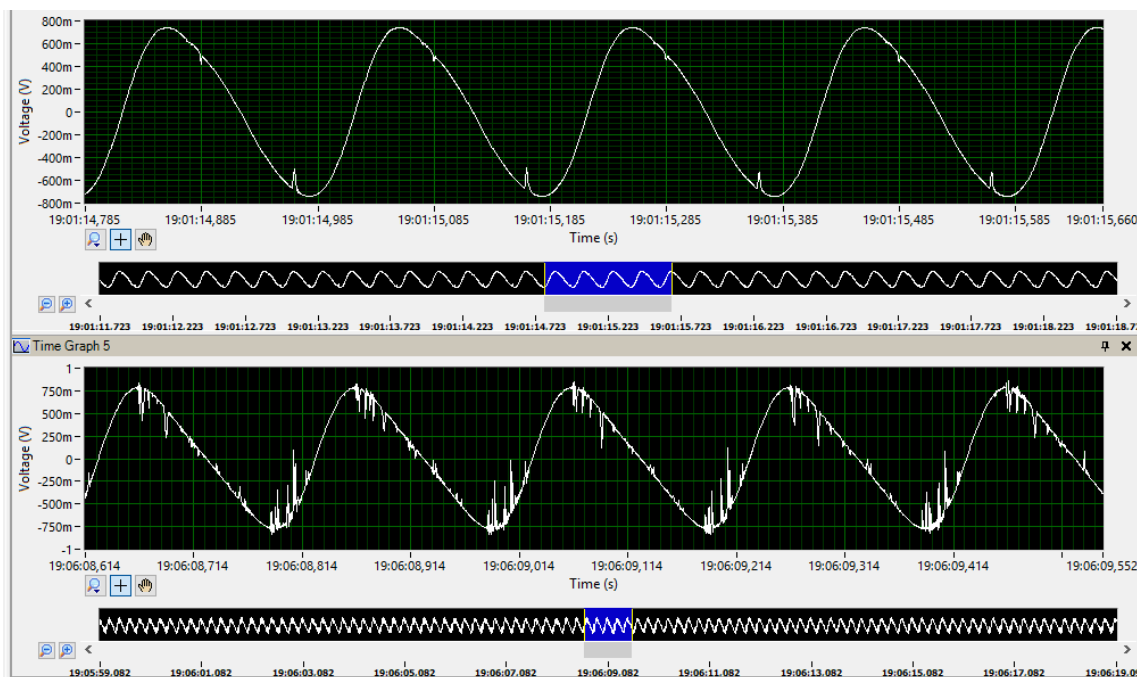


Obrázek 20 Detail na řešení umístění světlometu sloužící pro porovnání

4.5. Naměřené hodnoty na elektromechanickém vibrátoru

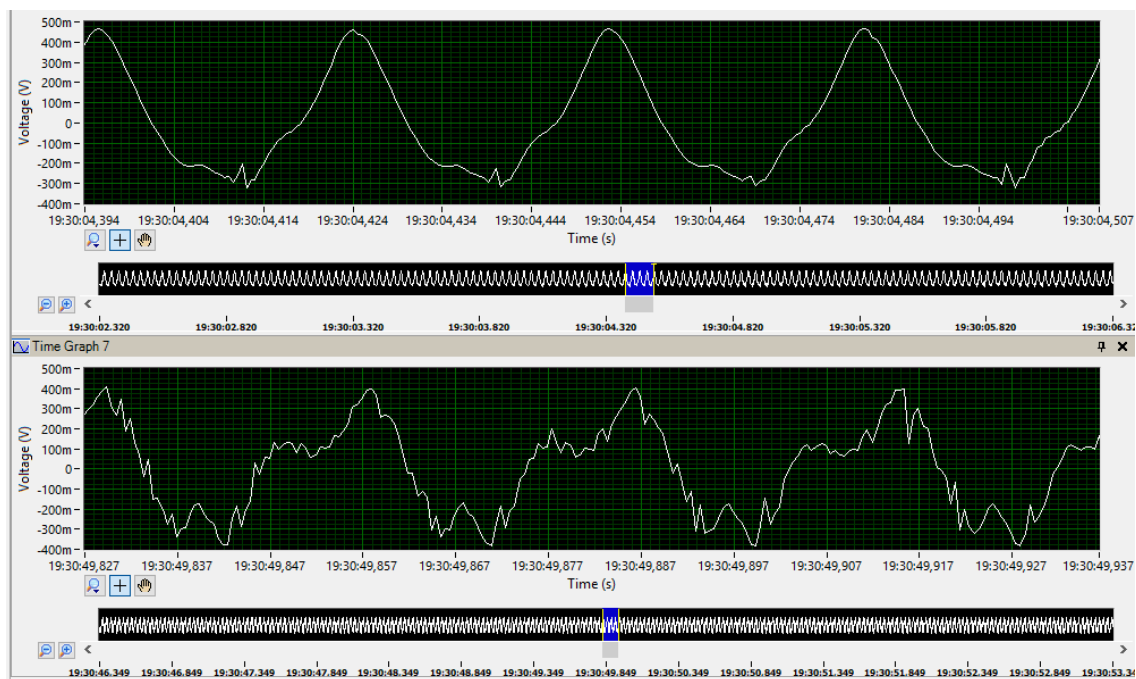
Bylo provedeno celkem 10x7 měření (validních) průběhů vibrací pro jednotlivé body a budící frekvence. Měřená veličina byla rychlost pohybu ve směru osy Z – směru vibrací. Vzhledem k tomu, že úroveň vibrací byla nastavena rozdílně pro každou frekvenci, byla měřena jak amplituda upínací desky, tak i jednotlivých bodů. Data jsou poté normalizována na úroveň zesílení či zesílení vůči amplitudě buzení.

Měřené body na povrchu komponent byly označeny černým permanentním značkovačem. V průběhu měření bylo experimentálně zjištěno, že laserový vibrometr má mnohem méně zašuměný signál při snímání hladkého lesklého povrchu závaží nahrazujících zdroje světla oproti černým značkám, proto byl snímán vždy bod poblíž černě označeného bodu měření. Měřený signál na povrchu rámečku vyrobeného 3D aditivní technologií byl také zašuměný (**Obrázek 21**). Šum byl ze signálu následně odstraněn digitální filtrací před dalším zpracováním. Na obrázku je vidět amplituda rychlosti pohybu povrchu, údaj není uveden v jednotkách [m/s], ale v měřeném napětí [V], protože nebyl kalibrován na reálné fyzikální veličiny a je použit pro určení poměrného zesílení – což je bezrozměrná veličina.



Obrázek 21 Ukázka záznamu dat, v horní části budící frekvence 5Hz, ve spodní části odezva na bodu 2 rámečku

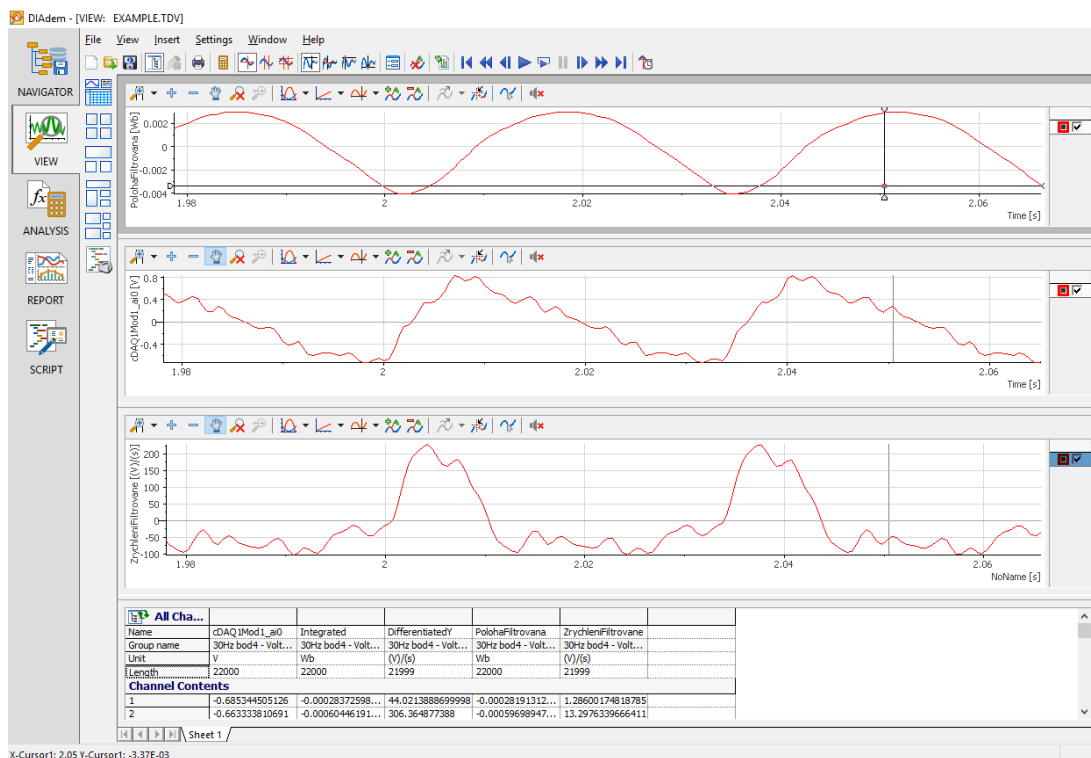
Pro vyšší zatěžovací frekvence se již projevovává nemožnost vibrátoru dosáhnout sinusového průběhu budicí frekvence (**Obrázek 22**), odezva systému na bodě je vidět na grafu ve spodní části.



Obrázek 22 Ukázka záznamu dat, v horní části budicí frekvence 35Hz, ve spodní části odezva na bodu 2 rámečku

4.6. Zpracování naměřených hodnot z elektromechanického vibrátoru

Zpracování naměřených hodnot bylo provedeno numerickou derivací a integrací. Pro potřeby analýzy vibrací sice stačí pouze derivace, ale pro ověření sinusového průběhu signálu vibrátoru byla provedena také integrace signálu. Vzhledem k šumu zdrojového signálu byl tento signál filtrován. Při integraci dochází vlivem nestejnoměrnosti v měřeném signálu k integraci neexistující polohy. Tento neexistující posun polohy je odstraněn filtrací filtrem typu high-pass s hraniční frekvencí 5Hz.



Obrázek 23 Zpracování dat v SW DIAdem, grafy od shora dolů reprezentují polohu, rychlost a zrychlení pro bod 4, 30Hz

Obrázek 23 zobrazuje původní naměřená data na rámečku (prostřední graf) reprezentující rychlost pohybu, graf integrované polohy (graf úplně nahoře) – jak je vidět je zde požadovaná sinusová poloha. Úplně spodní graf je derivací rychlosti a reprezentuje tedy zrychlení na měřeném bodu. Na grafu zrychlení je patrná nesouměrnost, daná poměrně velikou hmotou vzorku, kdy ve spodní úvrati musí vibrátor překonávat tíhové zrychlení a v horní úvrati ne (naopak mu pomáhá). Pro účely poměrného zpracování byly z grafů zrychlení pro všechny body a měřené frekvence odečteny maximální a minimální hodnoty a tyto byly následně znormovány vůči zrychlení základny.

Vzhledem k očividně nesymetrickému průběhu zrychlení, kdy plusové a minusové hodnoty byly významně odlišné, jsme se rozhodli provést normování zvlášť pro kladné a záporné hodnoty zrychlení.

Normování bylo provedeno jednoduchými vztahy:

$$a_{+norm \text{ bod } X \text{ freq } Y} = \frac{a_{+max \text{ bod } X \text{ freq } Y}}{a_{+max \text{ bod } 0 \text{ freq } Y}}$$

$$a_{-norm \text{ bod } X \text{ freq } Y} = \frac{a_{-max \text{ bod } X \text{ freq } Y}}{a_{-max \text{ bod } 0 \text{ freq } Y}}$$

$$a_{prům.norm \text{ bod } X \text{ freq } Y} = \frac{a_{+norm \text{ bod } X \text{ freq } Y} + a_{-norm \text{ bod } X \text{ freq } Y}}{2}$$

Normované hodnoty pro kladná zrychlení v jednotlivých bodech jsou uvedeny v tabulce pod textem (**Tabulka 4**). **Tabulka 5** uvádí normované hodnoty pro záporná zrychlení v jednotlivých bodech. Jak je vidět porovnáním hodnot obou tabulek, po normování byla nesouměrnost v průběhu zrychlení prakticky odstraněna a proto jsme se rozhodli pracovat s průměrnou hodnotou z obou tabulek.

Tabulka 4 Tabulka normovaných kladných zrychlení pro body 1 až 6

normované kladné zrychlení [-]						
	bod1	bod2	bod3	bod4	bod5	bod6
5Hz	1,000	1,014	1,072	1,234	1,189	1,066
10Hz	1,224	1,277	1,614	1,917	1,908	1,898
15Hz	0,888	0,723	0,791	0,806	0,714	0,603
20Hz	1,095	1,104	1,138	1,505	1,450	1,551
25Hz	1,517	1,555	1,961	2,486	2,185	2,051
30Hz	1,899	1,833	2,553	3,723	4,644	3,950
35Hz	1,322	1,068	1,152	3,319	3,228	3,292
40Hz	0,656	0,771	1,293	1,562	1,765	2,216
45Hz	0,473	0,871	1,485	1,332	1,580	1,552
50Hz	1,095	0,987	1,082	1,796	1,407	0,716

Tabulka 5 Tabulka normovaných záporných zrychlení pro body 1 až 6

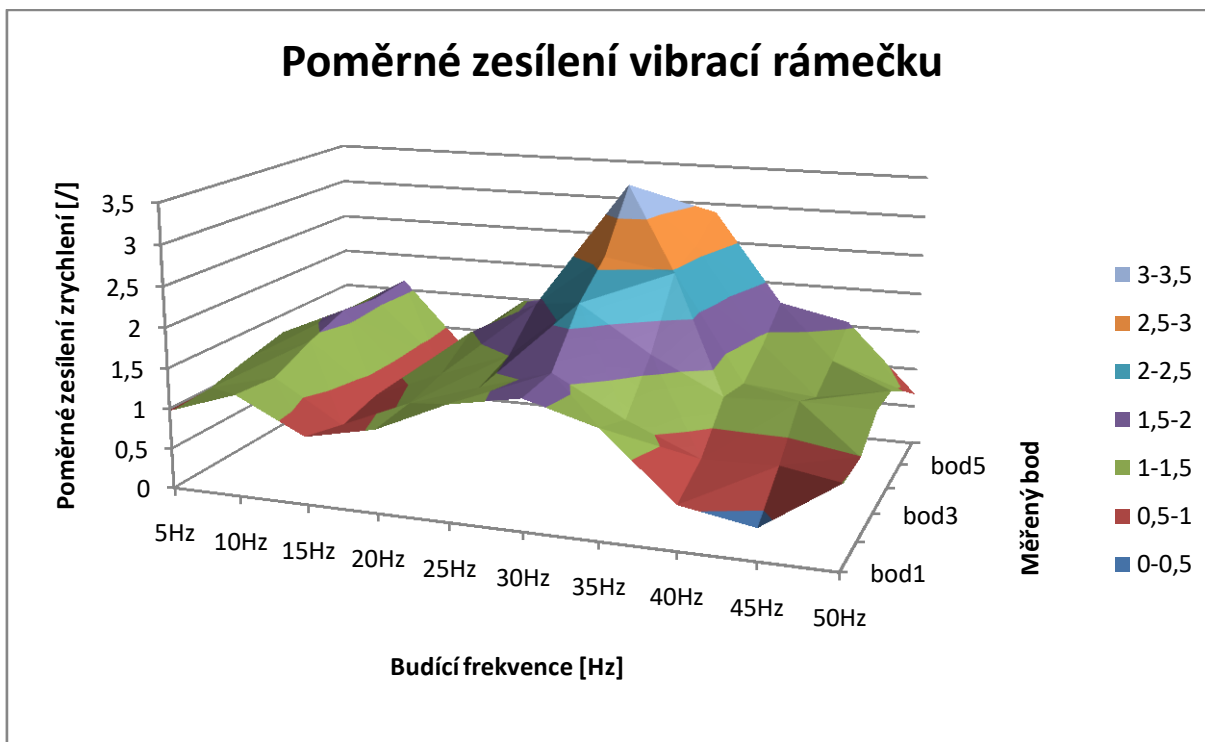
normované záporné zrychlení [-]						
	bod1	bod2	bod3	bod4	bod5	bod6
5Hz	0,955	0,987	1,201	1,281	1,098	1,066
10Hz	1,305	1,163	1,285	1,349	1,254	1,355
15Hz	0,797	0,673	0,847	0,858	0,888	0,867
20Hz	0,957	1,045	1,227	1,466	1,401	1,399
25Hz	1,319	1,151	1,042	1,388	1,239	1,163
30Hz	1,257	1,404	1,912	1,497	2,062	2,224
35Hz	1,334	1,218	2,204	1,622	2,004	2,477
40Hz	0,432	0,771	1,190	0,737	1,035	1,255
45Hz	0,312	0,716	1,074	0,797	0,971	1,546
50Hz	0,912	0,998	1,454	0,672	0,539	0,617

Tabulka 6 uvádí průměrnou normovanou hodnotu, získanou z průměru normovaného kladného a záporného zrychlení.

Tabulka 6 Tabulka normovaných průměrných zrychlení pro body 1 až 6

průměrné normované zrychlení [-]						
	bod1	bod2	bod3	bod4	bod5	bod6
5Hz	0,978	1,001	1,137	1,257	1,144	1,066
10Hz	1,264	1,220	1,450	1,633	1,581	1,627
15Hz	0,843	0,698	0,819	0,832	0,801	0,735
20Hz	1,026	1,074	1,183	1,486	1,426	1,475
25Hz	1,418	1,353	1,502	1,937	1,712	1,607
30Hz	1,578	1,619	2,232	2,610	3,353	3,087
35Hz	1,328	1,143	1,678	2,470	2,616	2,884
40Hz	0,544	0,771	1,241	1,150	1,400	1,735
45Hz	0,392	0,794	1,279	1,064	1,275	1,549
50Hz	1,004	0,993	1,268	1,234	0,973	0,667

Pro snadnější interpretaci naměřených dat, je **Tabulka 6** vynesena formou třírozměrného grafu (**Obrázek 24**). Jak je z obrázku patrné, v oblasti 30Hz dochází na rámečku k významnému zesílení budící frekvencí, což naznačuje, že se rámeček nachází v oblasti vlastní frekvence a bylo by vhodné změnou konstrukce docílit posunutí této frekvence mimo měřené pásmo.



Obrázek 24 Graf poměrných zesílení budících frekvencí na rámečku světlometu

Firma zabývající se výrobou a vývojem světelné techniky pro automobilový průmysl nám poskytla naměřené údaje, které slouží ke komparaci s námi naměřenými hodnotami. Poskytnuté údaje byly naměřeny ve zkušebnách zmiňované firmy. Poskytnutá měření byla prováděna mnohem delší dobu (většinou se jednalo o 3 testy trvající každý 8 hodin), z čehož se dá usoudit, že se jednalo spíše o testy únavy materiálu. Rozsah měřených frekvencí je také řádově několikanásobně rozsáhlejší v porovnání s naším testem. Pro nás však nejzajímavější údaj je první rezonanční frekvence světlometu. Ze 4 různých měření vycházely hodnoty první rezonanční frekvence v rozmezí 32 až 50Hz. Průměrná hodnota první rezonanční frekvence v tomto případě je 41,75 Hz. Při našem měření a po zpracování hodnot jsme zjistili, že v oblasti 30Hz dochází k významnému zesílení budící frekvence, což naznačuje, že jsme v oblasti vlastní frekvence rámečku. Řádově jsme tedy ve správné oblasti a měření tudíž poskytuje relevantní výsledky.

5. Metodika měření na hydraulickém válci

Stejně jako u předešlého měření na elektromechanickém vibrátoru je i u tohoto měření na hydraulickém válci cílem ověřit chování nosného rámečku světloometu při různých frekvencích. K vyvíjení frekvencí v tomto případě slouží hydraulický válec.

5.1. Výroba a sestavení přípravku proti protáčení pístnice hydraulického válce

Při zkušebním testování vibrování na hydraulickém válci se vyskytl problém spočívající v otáčení pístu hydraulického válce kolem své vnitřní osy. Toto otáčení znemožňovalo měřit vibrace na rámečku světloometu, jelikož laserem zaměřený bod se po spuštění hydraulického válce vzdálil ze své původní pozice. Z tohoto důvodu bylo třeba vyrobit přípravek, který tuto rotaci znemožňuje.

Na pístnici hydraulického válce se ve vzdálenosti 1,5 cm od vrcholu nachází dvě vybroušení, ležící naproti sobě. Do těchto vybroušení se vložila pásová ocel, která byla zbroušena po celé délce z 20mm na 18mm, což je šířka vybroušení na pístnici. Dalším krokem bylo dvojité ohýbání pásové oceli na ruční ohýbačce. Takto se materiál ohnul na požadovanou šířku, což umožnilo přesné vsunutí pásové oceli do zabroušení na pístnici hydraulického válce. Uprostřed byly proti sobě vyvrtány díry, které za pomoci šroubu přitahují obě protilehlé strany k sobě a fixují takto svou polohu na pístnici hydraulického válce. Další čtyři díry slouží k přišroubování ohýbaného plechu, který slouží jako horní úchyt pro hlazenou pojezdovou tyč lineárního vedení. Na protilehlé straně je přivařený obdélníkový jelek s dírou, která taktéž slouží jako horní úchyt pro pojezdovou tyč, viz **Obrázek 25**.



Obrázek 25 Horní úchyt přípravku pro uchycení k pístnici hydraulického válce

Následujícím krokem bylo vytvoření vnějších závitů M12 na hlazených pojezdových tyčích, které spolu s ložisky tvoří lineární vedení (**Obrázek 26**) a umožňují pohyb pouze v jedné ose. Tyto tyče byly za pomoci dvou matek přitahovaných proti sobě přichyceny k vyrobeným horním úchytům.



Obrázek 26 Pojezdové tyče s lineárními ložisky

Posledním krokem bylo vyrobení ocelové objímky, která obepíná hydraulický válec. Byla také vyrobena z pásové oceli šířky 20mm, která se za pomoci nahřívání ohýbala kolem ocelové kulatiny, která měla stejný průměr jako hydraulický válec. Na obou koncích jsou vyvrtány díry, skrze které se obě části přitahují k sobě. Vnitřek objímky je vybaven gumovým nalepovacím pásem, aby nedošlo k poškrábání laku hydraulického válce. Objímka byla vybavena dvěma matkami navařenými naproti sobě. Tyto matky byly převrtány na průměr ložisek a zabroušeny. Jsou také opatřeny dvěma dírami se závitem, kde se pomocí dotahování dvou šroubků udržuje poloha ložisek (**Obrázek 27**).



Obrázek 27 Ocelová objímka s držáky lineárních ložisek

Celá sestava přípravku proti protáčení pístnice hydraulického válce, včetně všech použitých šroubů, matek a podložek je zobrazena na následujícím obrázku (**Obrázek 28**).

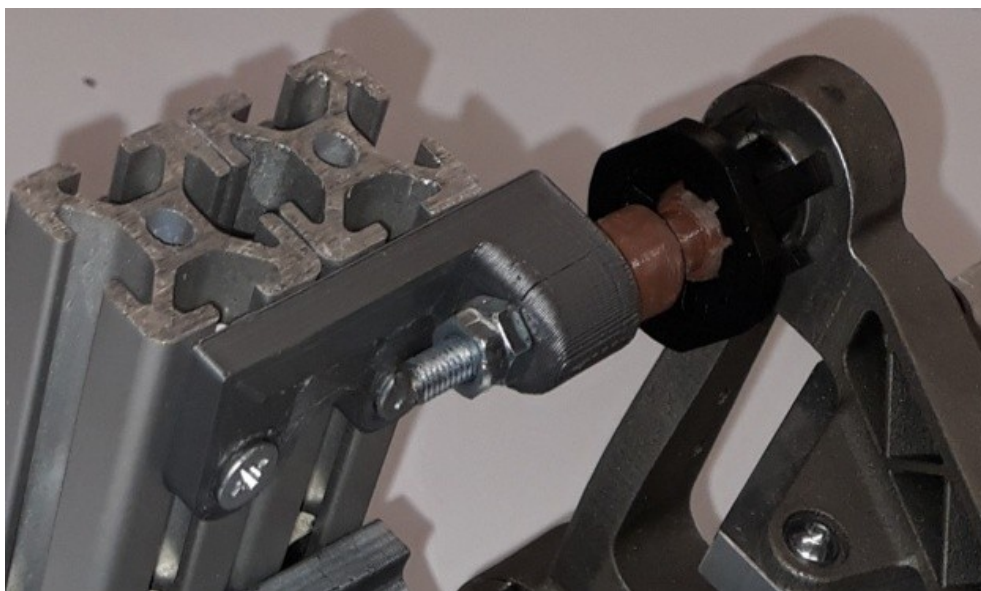


Obrázek 28 Sestava přípravku proti otáčení pístnice včetně všech komponent

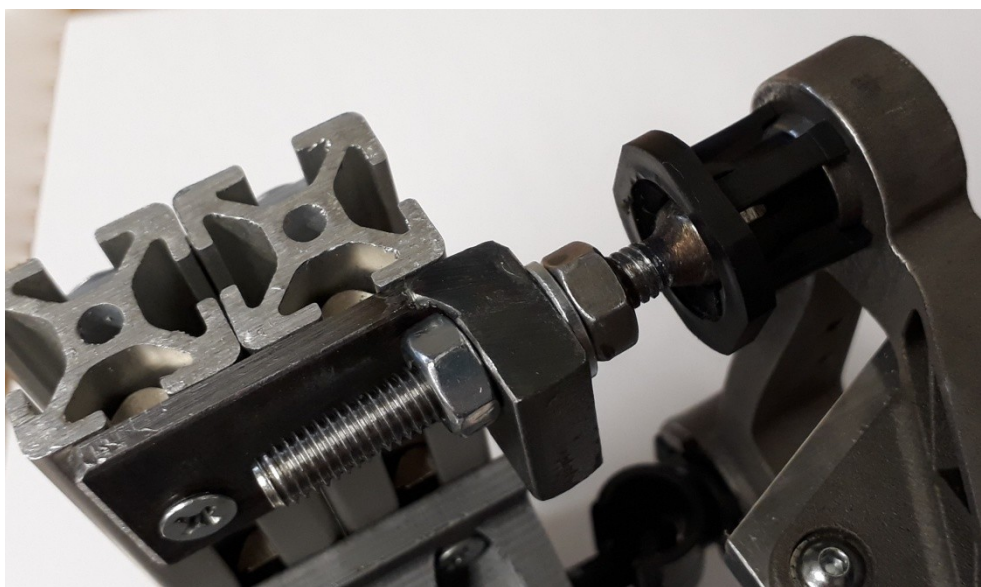
5.2. Testovací spuštění hydraulického válce

Došlo k sérii testovacích spuštění hydraulického válce, aby se v praxi odzkoušela účinnost vyrobeného přípravku proti protáčení pístnice. Přípravkem se problém podařil vyřešit. Avšak při dalších testovacích měřeních, v tomto případě s připevněným rámečkem světloometu včetně stojanu, se vyskytly další problémy v podobě zlomených 3D plastových výtisků. První zlomený výtisk sloužil jako jedno ze tří spojení mezi testovaným rámečkem světloometu a stojanem. Při vibrování byla tato součást vystavena velkému působení radiální síly. Proto byla snaha tuto část zpevnit pomocí tavné lepicí pistole, avšak ani tento krok nestačil a v průběhu testování došlo ke zlomení výtisku. Další zlomený plastový 3D výtisk sloužil pro uchycení již zmiňované součástky ke stojanu.

Oba tyto 3D plastové výtisky (**Obrázek 29**), u kterých došlo ke zlomení, se proto vyrobily z kovu (**Obrázek 30**) a při nadcházejících vibračních měřeních již nedošlo k žádnému problému.



Obrázek 29 Detail na sestavu plastového uchycení rámečku ke stojanu



Obrázek 30 Detail na kovovou náhradu zlomeného plastového uchycení

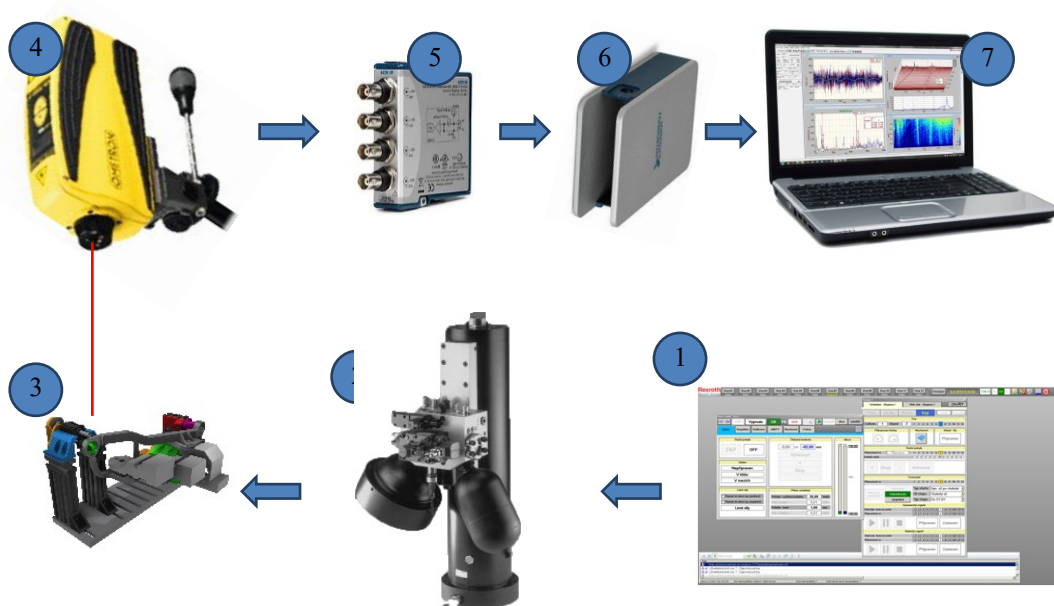
5.3. Měřené pásmo frekvence

Na rozdíl od testu, který byl proveden na elektromechanickém vibrátoru, kde se na rámeček světloometu působilo frekvencemi 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 a 50 Hz v tomto případě docházelo ke kontinuálnímu nárůstu frekvence v rozsahu 5 až 50 Hz. Mělo by tudíž dojít k přesnějšímu diagnostikování rezonanční frekvence, jelikož byly měřeny frekvence v celém rozsahu. Tato teze se potvrdila v praktické části tohoto měření.

Laserovým vibrometrem se měřily stejné body jako u měření na elektromechanickém vibrátoru, tj. základna, rámeček světloometu a závaží simulující zatížení světlometu.

5.4. Měřicí řetězec pro hydraulický válec

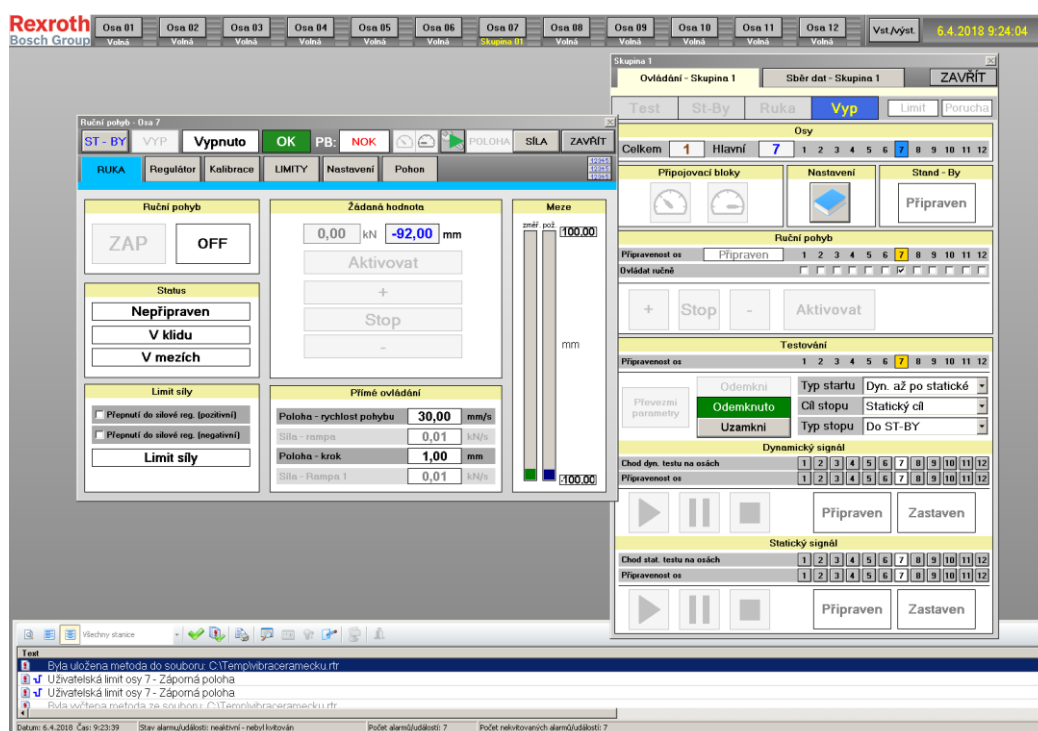
Měřicí sestava se skládá z mnoha komponent, viz **Obrázek 31**. V počítačovém programu (1), který slouží pro ovládání hydraulického válce, se nastaví veškeré parametry nutné pro provoz válce. Na pístnici hydraulického válce (2) je uchycen měřený rámeček včetně jeho držáku (3). Na vibrujícím rámečku je pomocí laserového vibrometru (4) měřena řada signálů na sedmi různých bodech, včetně hliníkové základny. Měřené signály jsou pomocí měřicí karty (5) a USB rozhraní (6) uloženy do notebooku (7). Následně dochází k jejich zpracování v softwaru DIAdem.



Obrázek 31 Schéma měřicího řetězce pro měření na hydraulickém válci

5.5. Postup měření na hydraulickém válci

Proměření frekvenční odezvy na rámečku světloometu vyžaduje měření různých bodů různými frekvencemi. Vibrování na hydraulickém válci umožnilo testovat celé frekvenční spektrum, a to od 5 do 50 Hz. Dalo se tedy předpokládat, že měření přinese přesnější výsledky, než tomu bylo u měření na elektromechanickém vibrátoru. Před samotným měřením docházelo k sérii testovacích spuštění hydraulického válce, při kterých se nejen zjistily mechanické nedostatky držáku rámečku světloometu, ale taky došlo k odladění parametrů pro ovládání hydraulického válce. To se provádělo v počítačovém programu, který obsluhuje chod válce (**Obrázek 32**).



Obrázek 32 Program ovládající chod hydraulického válce

Postup měření na hydraulickém válci se skládal z následujících kroků:

1. Nastavení odladěných parametrů hydraulického válce
2. Laserové zaměření jednotlivých bodů rámečku světloometu
3. Spuštění vibrování hydraulického válce
4. Zaznamenávání naměřených hodnot na notebook skrze měřicí kartu
5. Vyhodnocování naměřených dat v počítačovém softwaru

Uvedený postup se opakoval pro všech 6 bodů umístěných na rámečku světloometu, včetně základny držáku, která slouží k ověření správnosti vybuzečné frekvence.

5.6. Sestava měření na hydraulickém válci

Obrázek 31 ukazuje sestavu měření v praxi. Laserový vibrometr (pozice 1) zaznamenává na pohybujícím se rámečku světloometu (pozice 2) jednotlivě měřené body. Vertikální pohyb rámečku zabezpečuje hydraulický válec (pozice 3) na které je současně namontován přípravek proti protáčení pístnice. Data naměřená laserovým vibrometrem jsou poté skrze měřící kartu a USB rozhraní (pozice 4) posílána do notebooku (pozice 5), kde se ukládají v programu SignalExpress. Uložená data jsou poté přenesena do programu DIAdem, ve kterém dochází k jejich zpracování.



Obrázek 33 Sestava měření na hydraulickém válci v praxi

5.7. Zpracování naměřených hodnot z hydraulického válce

Zpracování naměřených hodnot bylo provedeno pro všech 6 bodů nacházejících se na rámečku, a také pro základnu. Celkově tedy bylo měřením získáno 7 výsledků. Vstupní data získána z laserového vibrometru byla v jednotkách V. Bylo tedy potřeba všechny získané výsledky vynásobit koeficientem 0,125 což je hodnota vyčtena z datového listu laserového vibrometru. Po tomto přepočtu se z původní veličiny elektrického napětí získala veličina rychlosti. Vzhledem k šumu zdrojového signálu byl tento signál filtrován filtrem typu low-pass s hraniční frekvencí 250 Hz. Posledním krokem byla derivace veličiny rychlosti, z čehož bylo získáno zrychlení v jednotkách m/s^2 .

Poté byl pro každý signál zvlášť v softwaru DIAdem manuálně určen začátek spuštění vibračního testu. Tímto krokem se podařilo sjednotit začátek všech signálů a mohlo tedy dojít k vizuálnímu porovnání průběhu jednotlivých signálů.

Na obrázku pod textem je zobrazeno detail nastavení parametrů hydraulického válce. Vzhledem k tomu, že všech 7 signálů začíná ve stejnou dobu spuštěním hydraulického válce, dá se podle parametrů nastavení válce zjistit, v jaké době od spuštění vibrování se nachází jaká vybuzená frekvence. V našem případě je měřený rozsah roven 45 Hz a doba, za kterou tato frekvence proběhne je 90 vteřin. Z toho se dá zjistit, že například po 30 vteřinách od spuštění vibrování je na rámečku hydraulickým válcem vybuzena frekvence 20 Hz.

Generátor osy 7		
Dynamický		
Průběh	Sinus	
Startovní amplituda	0,50	mm
Cílová amplituda	0,50	mm
Offset	0,00	mm
Rampa amplitudy start	1,00	mm/s
Rampa amplitudy stop	1,00	mm/s
Startovní frekvence	5,00	Hz
Cílová frekvence	50,00	Hz
Rampa frekvence	0,50	Hz/s
Strmost výstupu	0,00	mm/s
Startovní fáz. posun	0	°
Cílová fáz. posun	0	°
Rampa fáz. posunu	0,0	°
Poloha / Síla	Poloha	

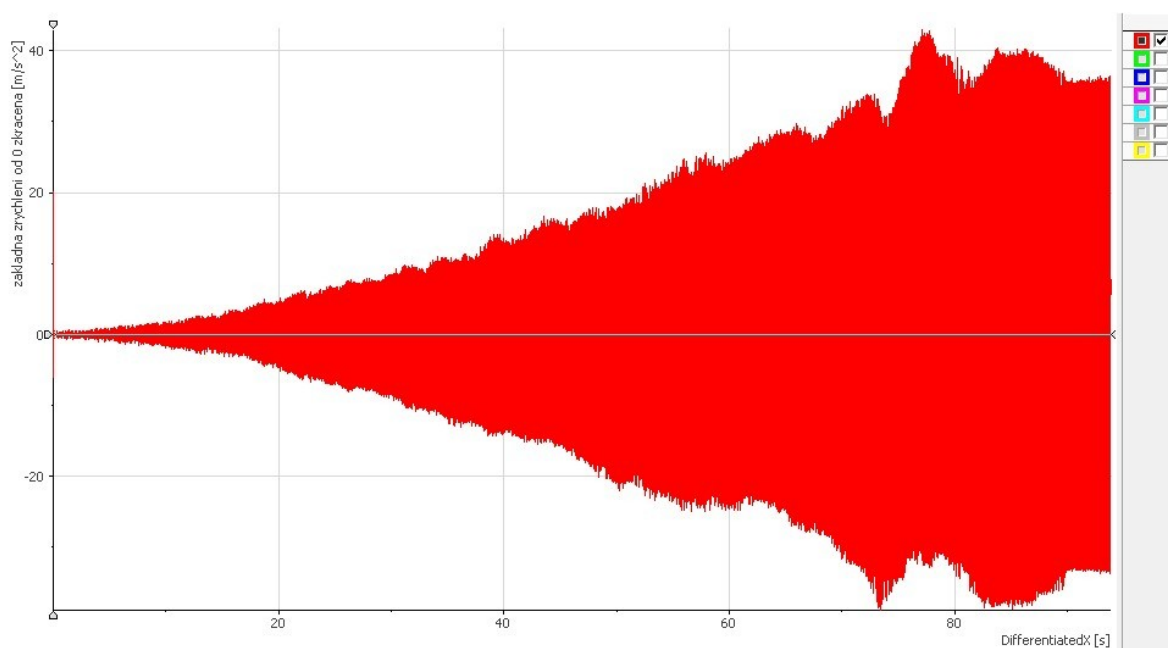
Obrázek 34 Detail nastavení parametrů hydraulického válce

Zpracování grafů při testu na hydraulickém válci

První zpracování dat bylo provedeno stejným způsobem, jako zpracování dat u testu na elektromechanickém vibrátoru. Pro hodnoty frekvence 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 a 50Hz byla vizuálně určena maxima a minima period. Nepřineslo to však žádné relevantní výsledky, jelikož rezonanční pásmo se nenacházelo v pozorovaných bodech.

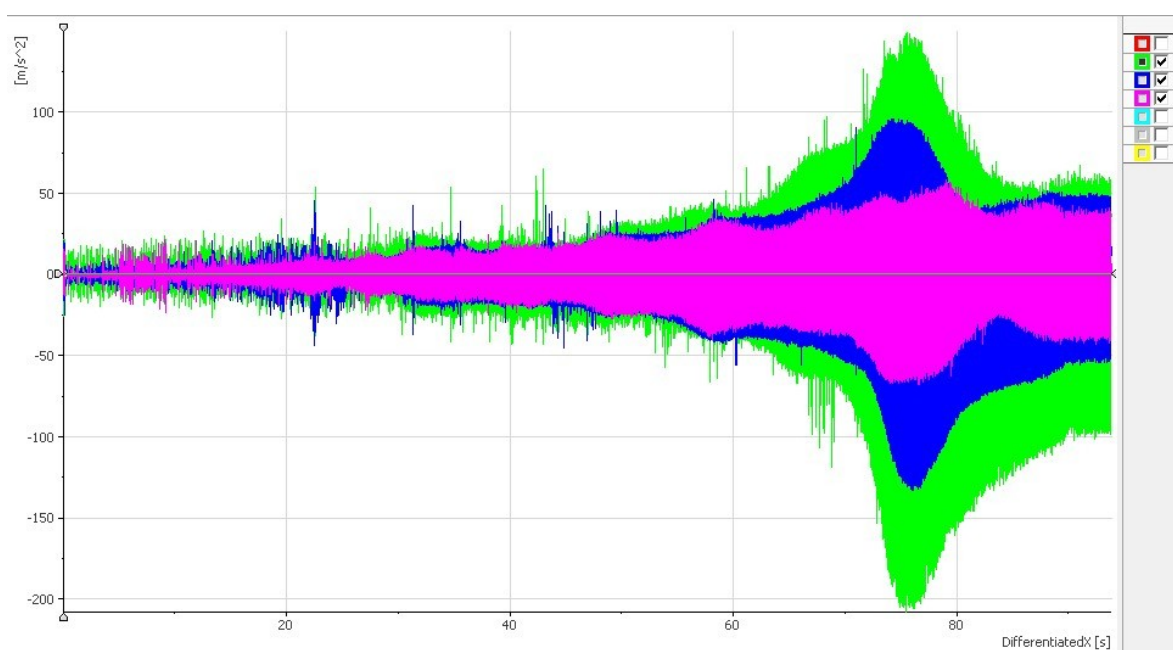
Bylo tedy provedeno druhé zpracování dat, které bylo zaměřeno na určitý úsek frekvenčního pásma. Vizuálně bylo vypořádováno, že rezonanční pásmo se nachází v úseku přibližně od 40 do 46 Hz. Tento úsek tedy byl důkladněji pozorován v softwaru DIAdem s krokem 1 Hz.

Obrázek 35 ukazuje finální graf pro základnu se všemi provedenými úpravami. Teoreticky by měl tento graf vykazovat parabolický hladký růst v rozmezí 5 až 50Hz, což na ose odpovídá začátku v 0 a končí v 90 vteřinách. Prakticky však parabolický růst nemá hladký průběh, což je pravděpodobně zapříčiněno neschopností hydraulického válce vyvinout požadované frekvence s požadovanou amplitudou. Hodnoty maximální a minimální periody se v tomto případě pohybují okolo $\pm 40\text{Hz}$.



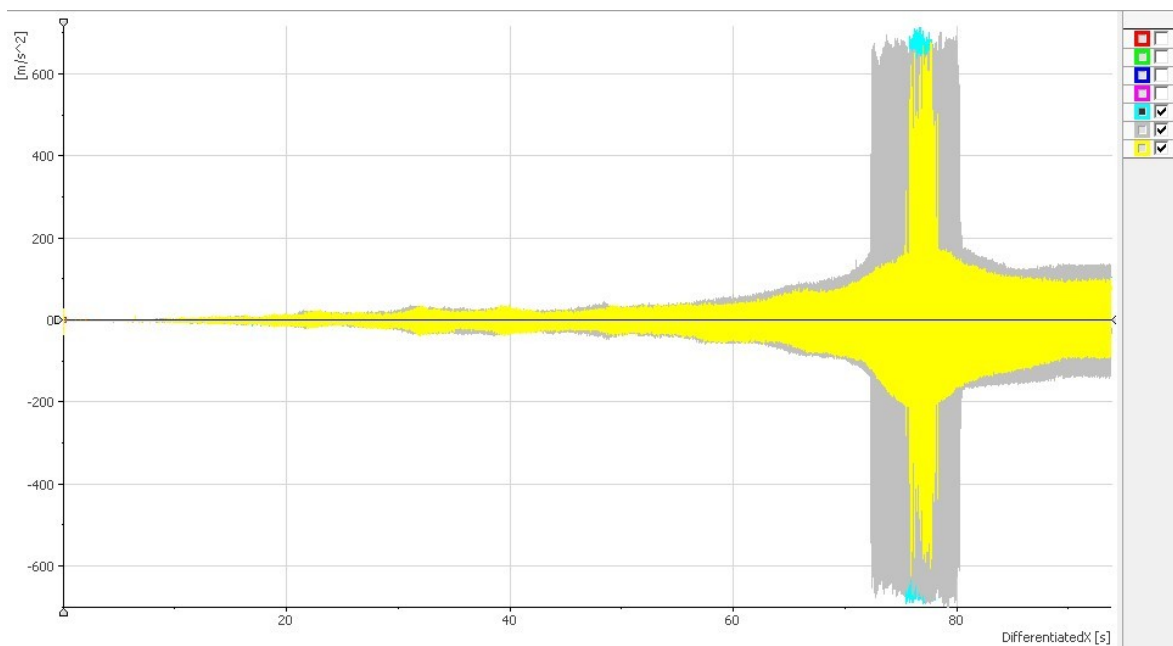
Obrázek 35 Finální graf zrychlení základny při testu na hydraulickém válci

Na dalším grafu (**Obrázek 36**) je zobrazen průběh chování bodů 1 (označený zeleně), 2 (označený modře) a 3 (označený růžově) nacházejících se na předmětu testování, tedy na rámečku světloometu. Rozsah zrychlení je řádově vyšší než v případě rozsahu u základny, a to $\pm 125 \text{ m/s}^2$. V časovém intervalu od 0 do 60 vteřin vykazují všechny 3 grafy občasné vychýlení od parabolického nárůstu velikosti periody, což je s největší pravděpodobností způsobeno chybou při měření. Pro nás zajímavá oblast se nachází v intervalu od 70 do 82s, což po přepočtu znamená oblast v rozmezí 40 až 46 Hz. Tato oblast byla následně zkoumána v další části této práce.



Obrázek 36 Finální grafy zrychlení bodů 1, 2 a 3 nacházejících se na rámečku světloometu

Poslední graf (**Obrázek 37**) ukazuje chování bodů 4 (označený tyrkysově), 5 (označený šedě) a 6 (označený žlutě). Tyto tři body se nacházely na závažích rámečku světloometu, která simulují zatížení rámečku v praxi. Rozsah zrychlení je v tomto případě největší ze všech tří pozorovaných částí, a to $\pm 600 \text{ m/s}^2$. Pravděpodobně je to zapříčiněno největší vzdáleností měřených předmětů od uchycení rámečku světloometu ke stojanu. Oblast s největším zrychlením je ve stejném intervalu jako v případě u bodů 1,2 a 3 a bude také zkoumána v pozdější části této práce.



Obrázek 37 Finální grafy zrychlení bodů 4,5 a 6 nacházejících se na závažích

Odečítání hodnot z grafů zrychlení

V softwaru DIAdem byly všechny naměřené body zkoumány v intervalu frekvence od 40 do 46 Hz. Pomocí funkcí v programu DIAdem bylo při frekvencích 40, 41, 42, 43, 44, 45 a 46 odečteno vždy maximum a minimum periody zrychlení. Data pro všech 6 bodů se zanesly do tabulky a porovnály se základnou pro každou frekvenci zvlášť. Získala se tedy vždy největší poměrná hodnota (**Tabulka 7**), a nejmenší poměrná hodnota (**Tabulka 8**).

Tabulka 7 Normované kladné zrychlení pro body 1 až 6 rámečku světloometu

normované kladné zrychlení [-]						
	bod1	bod2	bod3	bod4	bod5	bod6
40Hz	2,555	1,753	1,298	2,807	3,517	2,604
41Hz	2,903	2,252	1,296	3,348	4,590	3,279
42Hz	4,387	3,067	1,552	4,939	21,842	4,484
43Hz	3,865	2,501	1,168	17,739	17,513	4,343
44Hz	3,199	1,989	1,332	17,043	16,976	4,530
45Hz	2,440	1,306	1,369	4,288	5,389	3,663
46Hz	1,989	1,067	1,093	3,641	4,296	3,430

Tabulka 8 Normované záporné zrychlení pro body 1 až 6 rámečku světlometu

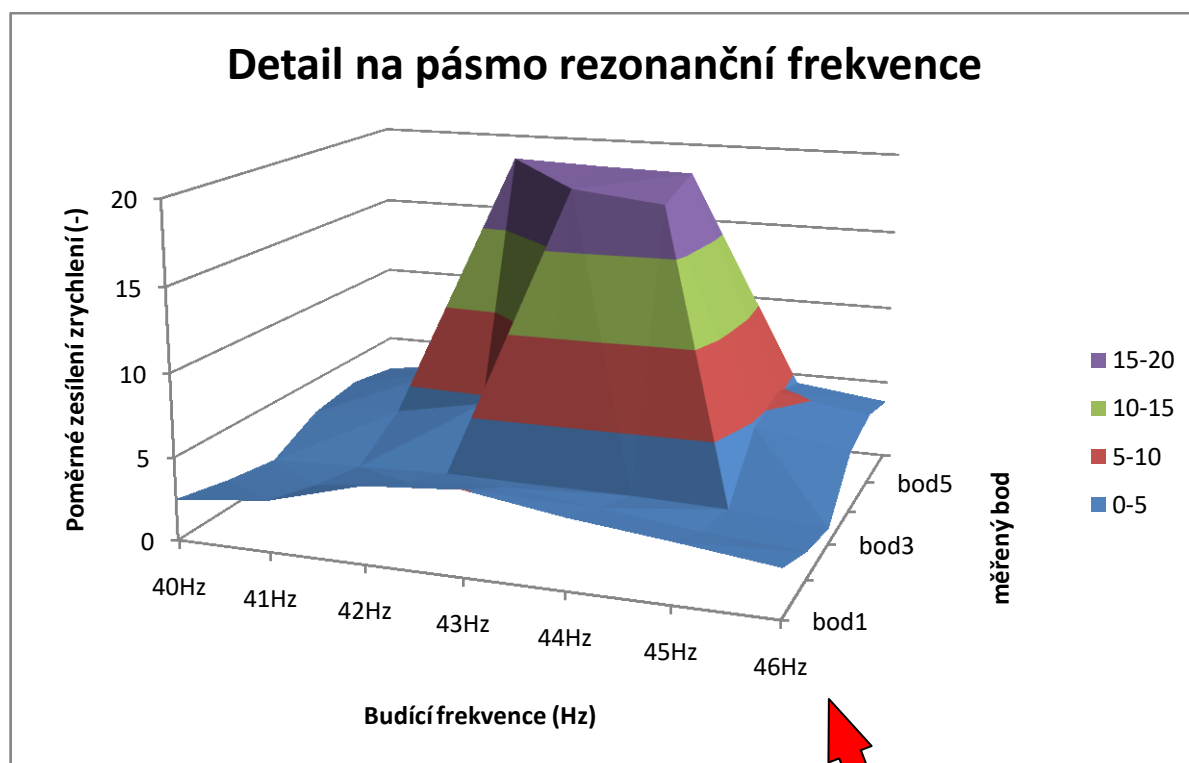
normované záporné zrychlení [-]						
	bod1	bod2	bod3	bod4	bod5	bod6
40Hz	2,410	1,757	1,196	2,764	3,039	2,891
41Hz	3,301	2,019	1,603	3,464	4,169	3,565
42Hz	4,907	2,860	1,752	4,064	16,945	4,701
43Hz	6,331	4,163	2,002	19,659	20,851	6,837
44Hz	5,243	3,553	1,824	19,092	21,124	6,354
45Hz	4,739	2,815	1,479	5,109	5,262	5,157
46Hz	3,784	2,231	0,836	4,074	4,601	3,917

Tabulky pro normované kladné i záporné zrychlení se zprůměrovaly, stejně jako v případě u měření na elektromechanickém vibrátoru, a data se zanesly do výsledné tabulky (**Tabulka 9**), znázorňující průměrné normované zrychlení.

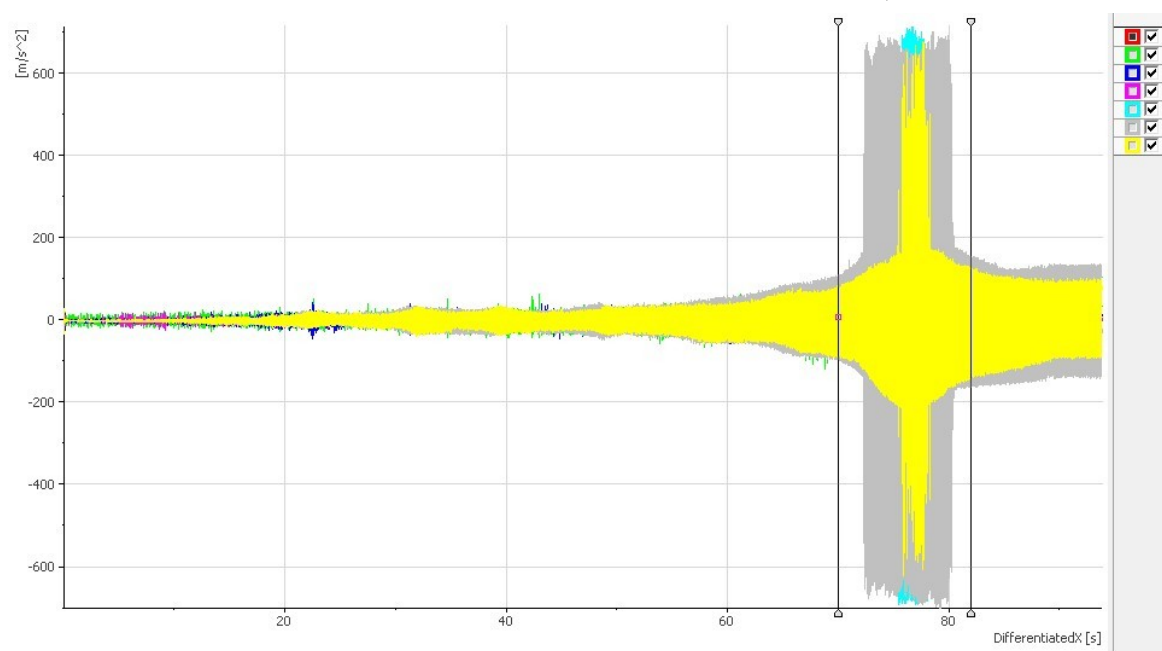
Tabulka 9 Normované průměrné zrychlení pro body 1 až 6 rámečku světlometu

průměrné normované zrychlení [-]						
	bod1	bod2	bod3	bod4	bod5	bod6
40Hz	2,483	1,755	1,247	2,786	3,278	2,747
41Hz	3,102	2,135	1,449	3,406	4,379	3,422
42Hz	4,647	2,963	1,652	4,501	19,394	4,592
43Hz	5,098	3,332	1,585	18,699	19,182	5,590
44Hz	4,221	2,771	1,578	18,068	19,050	5,442
45Hz	3,590	2,060	1,424	4,699	5,326	4,410
46Hz	2,886	1,649	0,964	3,857	4,448	3,673

Pro snadnější interpretaci dat byla **Tabulka 9** vynesena do třírozměrného grafu (**Obrázek 38**) stejně jako v případě u testu na elektromechanickém vibrátoru. Z obrázku je patrné, že v oblasti od 40 do 46 Hz dochází ke zjevnému zesílení budící frekvence, což naznačuje, že se tato oblast nachází v rezonanční frekvenci rámečku. Na **Obrázek 39** je zobrazen graf celého měřeného frekvenčního pásma. Data nacházející se v pásmu mezi kurzory, což odpovídá frekvenci 40 až 46 Hz, byla předmětem zkoumání této části práce. Graf nad tímto obrázkem je detail této popisované části po kompletním zpracování.



Obrázek 38 Graf s detailem na chování rámečku v rozsahu 40 až 46 Hz



Obrázek 39 Finální graf zrychlení se všemi body včetně základny

6. Závěr

Byly provedeny dvě série měření na dvou pracovištích s cílem zjistit chování rámečku světloometu při vibračním zatížení. V obou případech měření vibrační odolnosti rámečku světloometu bylo postupováno metodou sinusového vybuzení celé sestavy rámečku. Tato sestava je složena z kovového rámečku, závaží simulující reálné zatížení světloometu, držáku rámečku světloometu a hliníkové podstavy.

První měření bylo provedeno na elektromechanickém vibrátoru. Měřením byla zjištěna citlivost celé sestavy na frekvence v oblasti 30 Hz – tedy v oblasti, která se běžně vyskytuje při provozu automobilu. Tato situace může být zapříčiněna mnoha faktory. Může se jednat o skutečnou vlastní frekvenci měřených komponent, nebo může být zdrojem problému i upínací mechanismus, který je proveden jiným způsobem než v reálném světloometu. Tento upínací mechanismus může mít za následek nehladký průběh měřené veličiny a to hlavně ve vyšších frekvencích. Pravděpodobně je to zapříčiněno kmitáním celé sestavy nejen ve směru měřené osy Z, ale také kmitavých vykláněním od osy Z. V takovém případě laserový vibrometr zaznamenává nestejnoměrné průběhy. Je to způsobeno drobným vychýlením laserem měřeného bodu ze své původní pozice.

Druhé měření, provedené na hydraulickém válci, přineslo větší množství výsledků. Před měřením samotným docházelo k velkému počtu testovacích spuštění hydraulického válce, za účel odladění parametrů pro provoz válce. Tyto testy také objevily nedostatky 3D plastových výtisku, držících rámeček ke stojanu, v podobě jejich zlomení. Vadné části byly nahrazeny kovovými, a mohlo tedy dojít k bezproblémovému měření. Při samotném měření docházelo ke kontinuálnímu nárůstu vybuzené frekvence v rozmezí 5 až 50 Hz. Test pro každý bod trval 90 vteřin a umožnil sledovat celý průběh chování rámečku. Ze zpracovaných grafů se dalo vizuálně určit, že celá měřená soustava začala rezonovat v rozmezí 40 až 46 Hz. Při provádění měření se tento jev dal vnímat i za pomoci sluchu. Celá soustava v určitém okamžiku začala rezonovat a jev byl doprovázen i zvukovým efektem.

Obě prováděná měření přinesla výsledky, které se prakticky shodují s daty poskytnutými firmou, zabývající se výrobou a vývojem světelné techniky. Podle poskytnutého dokumentu se první rezonanční frekvence nacházejí průměrně v oblasti okolo 41 Hz. V případě testu na elektromechanickém vibrátoru byl zjištěn první výskyt rezonanční frekvence okolo 30 Hz.

Toto měření neposkytlo příliš přesné výsledky, jelikož měření bylo limitováno počtem měřených frekvencí. Mohlo se tedy stát, že nebyly sledovány oblasti frekvence, ve kterých mohlo dojít k výskytu rezonanční frekvence. Měření však nebylo tolik technologicky a prostorově náročné. Oproti tomu měření na hydraulickém válci bylo časově, prostorově i technologicky náročné. Zejména obsluha hydraulického válce vyžaduje profesionální obsluhu. Měření však přineslo výsledky téměř shodující se s poskytnutými materiály, a to výskyt první rezonanční frekvence v rozsahu 40 až 46 Hz. Pro příští měření by bylo vhodné upravit konstrukci držáku rámečku. Celá sestava by se pro měření na hydraulickém válci měla zkonstruovat bytelnější, ideálně z kovových materiálů.

Literatura

- [1] TŮMA, Jiří. Diagnostika strojů. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2116-0.
- [2] VOJÁČEK, Antonín: principy akcelerometrů – 1. Díl – piezoelektrické. Citace: 2. 1. 2018, přístup z internetu: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
- [3] SMETANA, Ctirad. Hluk a vibrace: měření a hodnocení. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [4] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. Technická diagnostika a spolehlivost. II, Vibrodiagnostika. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0650-9.
- [5] FyzWeb, Dopplerův jev a rázová vlna, Citace: 18. 2. 2018, Přístup z internetu: http://fyzweb.cz/materialy/aplety_hwang/Doppler/index.html
- [6] Trider, KOV (SLS), Citace: 20. 2. 2018, přístup z internetu: <https://trider.cz/material/kov>
- [7] Polytec, Laser Doppler Vibrometry, Citace: 11. 2. 2018, přístup z internetu: [https://www.polytec.com/int/vibrometry/technology/\\$laser-doppler-vibrometry/\\$single-point-vibrometry/](https://www.polytec.com/int/vibrometry/technology/$laser-doppler-vibrometry/$single-point-vibrometry/)
- [8] KREIDL, Marcel; ŠMID, Radislav. Technická diagnostika: senzory – metody – analýza signálu. 1. Vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [9] Mr. Surajkumar Kharche, Mr. Prashant Karajagi, Mr. Rahul Kulkarni. "Design Development and Vibration Analysis of MCM300 Headlamp", International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), August 2016. ISSN:2231-5381. www.ijettjournal.org
- [10] Mannesmann Rexroth, Servo Cylinders Series CGS 280, datový list, Citace: 14. 4. 2018

Zdroje obrázků

- Obrázek 2 Laserový vibrometr OMETRON VH 1000-D, adresa webové stránky: <http://diag.duf.hu/index.php/eszkozok/erintesmentes-rezg-mero/26-maidlab/eszkoezoek>
- Obrázek 3 Funkční generátor MATRIX MFG 2110A, adresa webové stránky: <http://en.taiweichina.com/product/4901/>
- Obrázek 4 Vibrátor TIRA TV52110, adresa webové stránky: <https://zetlab.com/shop/sistemy-pod-kluch/vibrostendy-i-suv/vibrostebody-maloy-moshnosti/vibratsionnyy-i-udarnyy-stend-tv-52110-2/>
- Obrázek 5 Zesilovač signálu BAA120, adresa webové stránky: http://www.astena.ru/tv50009_51110.html
- Obrázek 6 Karta NI cRIO 9233, adresa webové stránky: <http://www.ni.com/en-us/support/model.ni-9234.html>
- Obrázek 7 Rozhraní cDAQ 9171, adresa webové stránky: <http://www.ni.com/cs-cz/support/model.cdaq-9171.html>